

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži**

**Diplomski rad**

**Krunoslav Razumović**

**Osijek, 2016**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek, 03.10.2016.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Krunoslav Razumović
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-758, 23.10.2013.
<b>OIB studenta:</b>	42653209144
<b>Mentor:</b>	Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Objasniti osnovni princip rada spremnika električne energije. Pregled spremnika prema vrsti, načinu rada, veličini. Napraviti projekt priključenja spremnika električne energije u distribucijsku mrežu.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 Jasnoća pismenog izražavanja: 2 Razina samostalnosti: 2
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	03.10.2016.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 05.10.2016.

Ime i prezime studenta:	Krunoslav Razumović
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-758, 23.10.2013.
Ephorus podudaranje [%]:	27 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## IZJAVA

Ja, Krunoslav Razumović, OIB: 42653209144, student/ica na studiju: Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, dajem suglasnost Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek da pohrani i javno objavi moj **diplomski rad**:

**Spremnici električne energije u distribucijskoj mreži**

u javno dostupnom fakultetskom, sveučilišnom i nacionalnom repozitoriju.

Osijek, 05.10.2016.

---

potpis

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	POTREBE POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	1
2.1	Vremensko razdvajanje .....	2
2.2.	Regulacija .....	2
2.3.	Rotirajuća, nerotirajuća i dodatna rezerva .....	3
2.4.	Održavanje napona u mreži .....	4
2.5.	Beznaponski ili crni start (engl. Black start) .....	4
2.6.	Korištenje za pohranu energije sunca i vjetra (praćenje opterećenja) .....	5
2.7.	Regulacija frekvencije .....	7
2.8.	Odgoda nadogradnje prienosne mreže .....	9
2.9.	Održavanje napona u distribuciji i odgoda nadogradnje distribucijske mreže .....	9
2.10.	Kvaliteta električne energije .....	10
3.	NAČINI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	12
3.1.	Reverzibilne hidroelektrane .....	12
3.2.	Spremnici s komprimiranim fluidom .....	13
3.3.	Zamašnjak .....	16
3.4.	Baterijski spremnici električne energije .....	20
•	Li-ion .....	21
•	Natrij sumpor baterija (NaS) .....	23
•	Vanadij-redox protočna baterija .....	25
•	Cink brom baterija .....	27
•	Cink zrak baterija .....	27
3.5.	Superkondenzatori .....	28
4.	PROJEKT PRIKLJUČENJA NA MREŽU .....	32
4.1.	Karakteristike elektroenergetskih sustava za pohranu podataka .....	32
4.2.	Procjena sustava za pohranu električne energije .....	32
•	Korak 1a mogućnosti mreže/moguća rješenja .....	33
•	Korak 1b zahtjevi mreže .....	34
•	Korak 2 izvedivi oblici uporabe .....	35
•	Korak 3 utjecaj na mrežu i prednosti .....	36
•	Korak 4 proračun profita ugradnjom spremnika .....	37
5.	Snimanje napona i struje punjenja i pražnjenja baterija .....	38

6. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46
SAŽETAK.....	48
ABSTRACT .....	48
Životopis .....	49

## **1. UVOD**

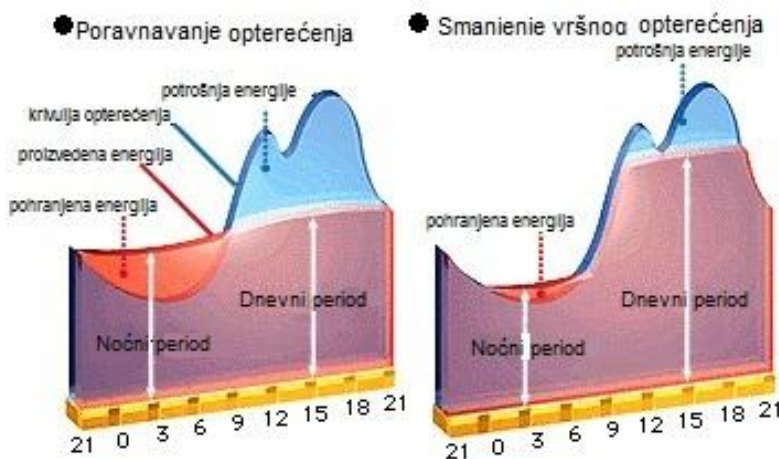
U diplomskom radu su opisani osnovni principi rada spremnika električne energije pregled spremnika i opis rada svake pojedine vrste spremnika. U prvom poglavlju diplomskog rada navedeni su razlozi za pohranom električne energije te prednosti pohrane električne energije za cijelu mrežu. U drugom poglavlju opisane su tehnologije koje se koriste za pohranu električne energije te njihove prednosti i nedostaci. U trećem poglavlju diplomskog rada navedeni su i opisani koraci koje je potrebno izvršiti kako bi se odredila veličina spremnika električne energije koja je potrebna za određenu lokaciju za koju se vrši proračun. U četvrtom poglavlju je izvršeno mjernje strujne i naponske karakteristike punjenja i pražnjenja baterije.

## **2. POTREBE POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Potreba za pohranom električne energije javlja se iz razloga da bi se moglo vremenski razdvojiti proizvodnju električne energije od potrošnje. Vremensko razdvajanje proizvodnje i potrošnje električne energije potrebno je zato da bi se omogućila ekonomičnija eksploatacija primarnih izvora energije te da bi se omogućilo povećanje udjela obnovljivih izvora energije, a posebno vjetroelektrana kojima je teško predvidjeti proizvedenu količinu električne energije zbog stohastičke prirode vjetra. A povećanjem broja obnovljivih izvora energije, posebno vjetroelektrana i solarnih elektrana, pojavljuje se sve veća potreba za pohranom električne energije. „Dnevna potrošnja energije, na primjer, trenutno premašuje noćnu. Kako veliki proizvođači energije u pravilu iz tehničkih razloga ne mogu tijekom noći prestati proizvoditi električnu energiju, noću uvijek raspolažemo izvjesnim viškom proizvedene energije dok se danju u vrhovima potrošnje možemo suočiti i s osjetnim nedostacima energije. Porastom standarda i broja ljudi koji žive u urbanim sredinama, brzim razvojem nekih zemalja, iscrpljivanjem zaliha fosilnih goriva, porastom potražnje i cijene energije te ujedno u težnji očuvanja okoliša, sve češće se poseže za obnovljivim izvorima energije kao što su npr. vjetar i sunce. Međutim, takvi su izvori energije nestalni jer uvijek postoje periodi kada vjetar nije dovoljno jak ili ga uopće nema, a sunce u punom intenzitetu ipak daje energiju samo tijekom određenog broja sati danju. Zbog toga se mogu javiti i potpuno suprotne prilike, gdje će npr. povećanjem proizvodnje energije na osnovi sunčeve energije (u nekoj manjoj izoliranoj zajednici, gradu, regiji ili državi) trebati dio energije dobivene danju sačuvati za potrošnju noću. Energiju u tom smislu općenito možemo pohranjivati na više načina, a ovisno o specifičnim prilikama i potrebama odabrati će se onaj način koji najbolje odgovara postojećim zahtjevima.“[1]

## 2.1 Vremensko razdvajanje

Vremensko razdvajanje proizvodnje i potrošnje električne energije uključuje kupnju jeftine električne energije za punjenje spremnika električne energije, tijekom razdoblja kada je cijena niska, tako da se pohranjena energija može koristiti odnosno prodati kasnije kada je cijena električne energije visoka. Alternativno, spremnici električne energije koriste se za spremanje „viška“ proizvedene električne energije, iz obnovljivih izvora energije poput vjetrova ili fotonaponskih ćelija. Za vremensko razdvajanje su veoma bitni varijabilni troškovi spremnika (koji nisu povezani sa energijom) i efikasnost spremnika. Vremensko razdvajanje uključuje mnoge transakcije temeljene na razlici troškova između cijene za kupovinu energije iz električne mreže, te troškova pohrane energije i dobiti ostvarene od predane energije natrag u mrežu. Dvije osobine proizvoda koje imaju značajan utjecaj na varijabilne operativne troškove spremnika električne energije su povratna učinkovitost sustava za pohranu i stopa po kojoj opada efikasnost sustava za pohranu kako se koristi. Osim toga, sezonsko i dnevno skladištenje električne energije može se smatrati kao glavna usluga spremnika električne energije. To može biti vrlo korisno za vjetroelektrane ili fotonaponske ćelije ako postoje značajne sezonske i dnevne razlike što je prikazano na slici 2.1.[2]



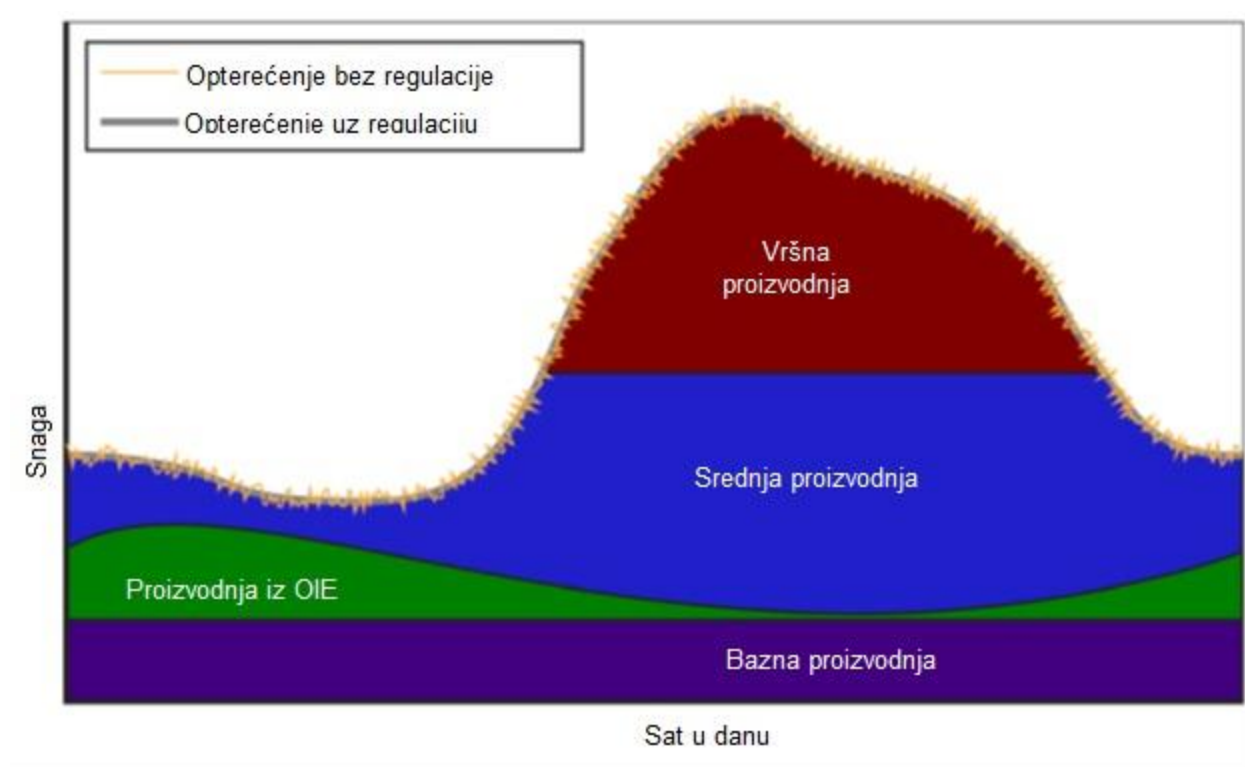
Slika 2.1 Prikaz vremenskog razdvajanja [5]

## 2.2. Regulacija

Regulacija je jedna od pomoćnih usluga za koju su spremnici električne energije posebno dobro prilagođeni. Regulacija uključuje upravljanje razmjene s drugim regulacijskim područjima koja su povezana razmjenom energije i troškova za područje na kojem se vrši regulacija. Proizvodne jedinice koje su u radu i spremne su za povećanje ili smanjenje proizvodnje po potrebi koriste se



za regulaciju i njihova proizvodnja se povećava kada postoji trenutni manjak proizvodnje koji omogućuje regulaciju. S druge strane, proizvodnja se smanjuje kako bi se regulacija provela kada postoji trenutni višak proizvodnje energije. Važna pretpostavka u ovom slučaju je da velike toplinske elektrane koje služe za pokrivanje baznog opterećenja kada se koriste za regulaciju predstavljaju značajan dodatni trošak kada daju promjenjivu snagu potrebnu za izvršavanje regulacije.[2] Na slici 2.2 nalazi se prikaz dijagrama opterećenja sa regulacijom i bez regulacije.



**Slika 2.2 Opterećenje s regulacijom i bez regulacije**

Opterećenje prikazano na slici 2.2 pokazuje mnoge fluktuacije uzrokovane neravnotežom između proizvodnje i potrošnje bez regulacije. Deblja linija na slici pokazuje ravniju liniju nakon što su se te fluktuacije ispravile regulacijom.[2]

### **2.3. Rotirajuća, nerotirajuća i dodatna rezerva**

Upravljanje električnom mrežom zahtijeva obveznu rezervu kapaciteta koji može biti iskorišten kada neki dio normalne električne opskrbe neočekivano postane nedostupan. Općenito, rezerve su barem jednako velike kao pojedini najveći dio sustava (npr. najveća pojedinačna proizvodna jedinica). Rezerve su uglavnom veličine od 15% do 20% normalnog električnog kapaciteta. **Rotirajuća rezerva**- proizvodni kapacitet koji je na mreži, ali neopterećen tako da može odgovoriti u roku od 10 minuta kako bi se kompenzirao ispad generatora ili dijela prijenosne

mreže. Frekvencijski osjetljiva rotirajuća rezerva odgovara u roku od 10 sekundi kako bi održala frekvenciju sustava. Rotirajuća rezerva se prva koristi kada se pojavi ispad.

**Nerotirajuća rezerva**- predstavlja rezervne kapacitete koji nisu sinkronizirani na mrežu, ali se mogu brzo staviti u pogon, sinkronizirati i opteretiti u roku od 10 minuta.

**Dodatna rezerva** - Generatori koji mogu započeti proizvodnju u roku od jednog sata. Njegova uloga je u suštini, podrška za rotirajuću i nerotirajuću rezervu. Dodatna rezerva može se koristiti i kao rezerva za komercijalnu prodaju energije. Za razliku od rotirajuće rezerve, dodatna rezerva nije sinkronizirana s frekvencijom mreže. Dodatna rezerva se koristi nakon što su sve rotirajuće rezerve u pogonu. Važno je za pohranu električne energije da kapacitet generatora, koji se koristi kao rezerva kapaciteta, mora biti na mreži i na raspolaganju. Za razliku od generatora, u gotovo svim okolnostima, spremnici električne energije koji se koriste za rezervni kapacitet, rijetko se koriste; spremnici električne energije jednostavno moraju biti spremni za upotrebu kada je to potrebno.[2]

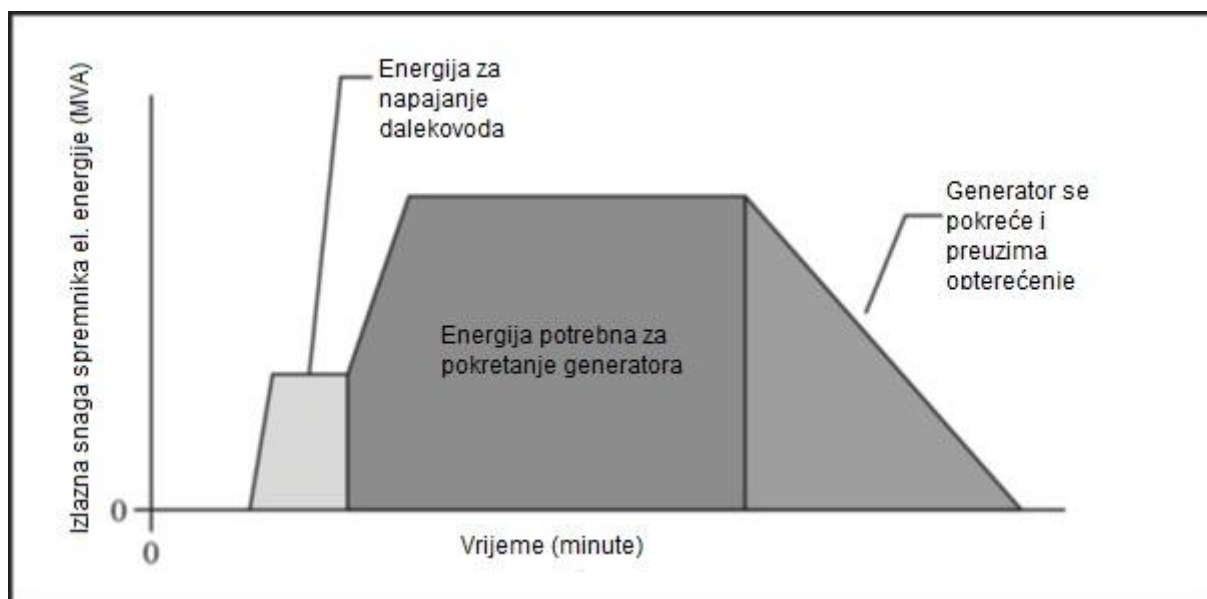
## 2.4. Održavanje napona u mreži

Zahtjev za operatora električne mreže je održavati napon unutar zadanih granica. U većini slučajeva, to zahtijeva upravljanje reaktancijom, što je uzrokovano uređajima povezanim na mrežu koji proizvode, prenose ili koriste električnu energiju, a često imaju karakteristike poput onih prigušnice i kondenzatora u električnom krugu. Za upravljanje reaktancijama na razini mreže, operator sustava održava napon mreže kako bi nadoknadio reaktivne učinke, tako da prijenosni sustav može raditi na stabilan način. Općenito, određene elektrane se koriste za generiranje jalove snage. Ove elektrane mogu se zamijeniti sa strateški postavljenim spremnicima električne energije u mrežu na središnjim lokacijama ili distribuiranim pristupom što znači postavljanje većeg broja sustava za pohranu jalove energije u blizini velikih opterećenja. Nazivno vrijeme potrebno za održavanje napona mreže smatra se da je 30 minuta.[2]

## 2.5. Beznaponski ili crni start (engl. Black start)

Sustavi za spremanje električne energije omogućuju aktivnu rezervu snage i energije u mreži i mogu se koristiti za uspostavu rada prijenosne i distribucijske mreže i osigurati da se elektrana vrati na mrežu nakon havarije mreže. Spremnici mogu poslužiti i za beznaponsko pokretanje elektrana, ako je sustav za pohranu prikladno smješten u mreži i postoji dostupan kapacitet na

prijenosnom vođu do elektrane od lokacije spremnika električne energije. Na slici 2.3 je vremenski prikaz beznaponskog starta.[2]



**Slika 2.3 Izlazna snaga spremnika pri beznaponskom startu**

## 2.6. Korištenje za pohranu energije sunca i vjetra (praćenje opterećenja)

Spremnici električne energije su posebno pogodni za prigušenje nepredvidivosti vjetra i fotonaponskih sustava te se često koriste kod takvih sustava. Tehnički, radni uvjeti za spremnike električne energije za ovu primjenu su isti kao i oni koji su potrebni za spremnike električne energije kada je potrebno brzo odgovoriti na brzu ili nepredvidivu promjenu potrošnje. Većina obnovljivih izvora s potrebom za pohranu će odrediti maksimalnu očekivanu gustoću energije koju može predati ili potrošiti od spremnika izraženu u MW/min i vrijeme trajanja korištenja. Opterećenje je određeno snagom na izlazu koja se uglavnom mijenja svakih nekoliko minuta. Odstupanje na izlazu je reakcija na promjenu u frekvenciji sustava i vremenskog slijeda opterećenja, ili korelacija frekvencije sustava u odnosu na vremenski slijed opterećenja koji se javlja ukoliko je potrebno održavanje zadane frekvencije sustava. Konvencionalne temeljne elektrane povećavaju snagu na izlazu kako bi slijedile zahtjeve kako se povećava opterećenje sustava. S druge strane, kako se smanjuje potražnja sustava tako se opterećenje sustava smanjuje. Uobičajeno, proizvodnja se koristi za praćenje opterećenja. Za praćenje opterećenja, proizvodnjom se upravlja tako da je izlazna snaga manja od nazivne snage proizvodne jedinice. To omogućuje operaterima da se poveća izlaz generatora, ako je potrebno, kako bi se pratilo opterećenje. Za smanjenje opterećenja, proizvodnja se nalazi na visokoj razini izlazne snage, možda čak i na nazivnoj snazi, a izlazna snaga se smanjuje kako se smanjuje opterećenje. Ovi

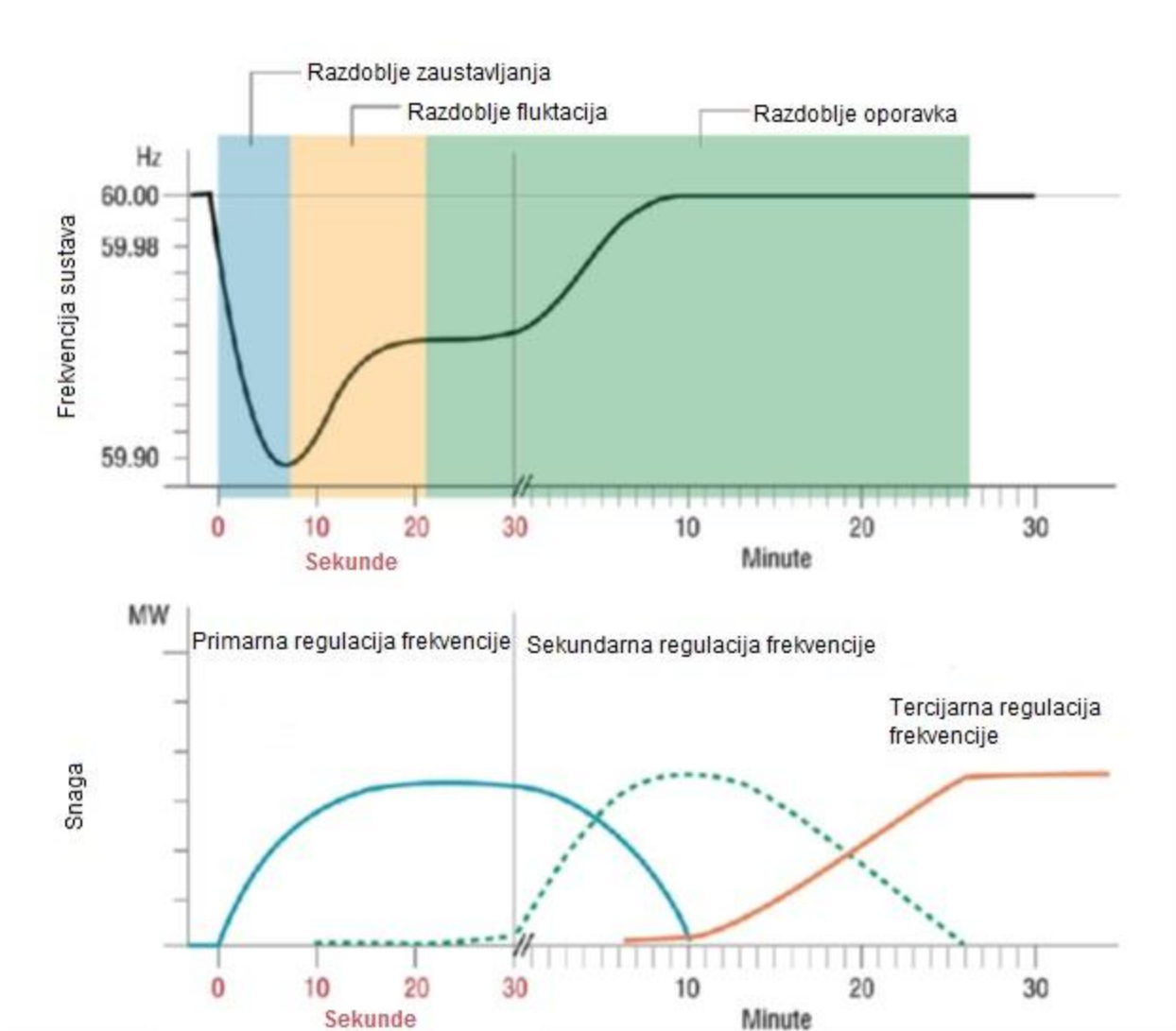
upravljački scenariji su značajni zbog toga što upravljanje proizvodnjom za malo opterećenje zahtijeva više goriva po megawat satu (MWh) i dovodi do povećane emisije zagađenja zraka po MWh u odnosu na proizvodnju kada elektrana radi nazivnom snagom. Promjena izlazne snage generatora (a ne rad sa stalnom snagom na izlazu) također povećava potrošnju goriva i emisiju zagađenja zraka, kao i potrebu za češćim održavanjem generatora, a time i varijabilnih operativnih troškova i troškova za održavanje. Osim toga, ako se elektrane na fosilna goriva moraju ugasiti tijekom perioda kada je opterećenje malo, doći će do značajnog povećanja potrošnje goriva, i emisije zagađenja zraka. Pouzdanost elektrane će se smanjiti, što dovodi do potrebe za značajnom kupnjom zamjenske energije. Spremnici su dobro prilagođeni za praćenje opterećenja iz nekoliko razloga. Prvo, većina spremnika može raditi da samo dio nazivne snage spremnika predaje u mrežu. Drugo, većina spremnika može reagirati vrlo brzo (u odnosu na ostale proizvodne jedinice) kada je potrebno više ili manje izlazne snage za praćenje opterećenje. Treba uzeti u obzir i to da se spremnik može učinkovito koristiti i za praćenje opterećenja kada se opterećenje povećava (pražnjenje spremnika) i za praćenje opterećenje kada se opterećenje smanjuje (punjenje spremnika). U tržišnim područjima, kada se spremnik puni kako bi pratio opterećenje, pohranjena energija mora biti kupljena po važećoj veleprodajnoj cijeni. To je važna stavka, posebno za spremnike s manjom učinkovitosti i/ili ako je energija koja se koristi za punjenje relativno skupa, jer cijena energije koja se koristi za punjenje spremnika, može premašiti vrijednost cijene koju spremnik može postići za praćenja opterećenja. S druge strane, vrijednost energije potrošene iz spremnika kako bi se pratilo opterećenje određuje se prema cijeni za veleprodaju energije. Spremnici koji se koriste za praćenje opterećenja trebaju biti pouzdani ili se ne mogu koristiti za pokrivanje ugovorne obveze u vezi s licitiranjem praćenja opterećenja na tržištu. Spremnici koji se koriste za praćenje opterećenja trebaju pristup automatskom upravljanju proizvodnje (AGC) iz odgovarajućeg neovisnog operatora sustava. Uobičajeno je da operator sustava traži da se izlazna snaga iz generatora koji su dostupni za automatsko upravljanje proizvodnje (AGC) mijenja svake minute.

Ostala korištenja spremnika su poveznice s drugim uslugama. Veliki odnosno centralni spremnici koji se koriste za praćenje opterećenja mogu biti osobito komplementarni s drugim uslugama, ako se punjenje i pražnjenje za ostale usluge može uskladiti. Na primjer, spremnik koji se koristi za napajanje mreže tijekom sredine dana može se puniti u večernjim satima te tako povećava opterećenje sustava tijekom večernjih sati kada je potražnja za električnom energijom smanjena, a smanjuje se opterećenje sustava tijekom sredine dana kada se spremnik prazni i kada je potražnja za električnom energijom povećana. Praćenje opterećenja moglo bi imati dobru

sinergiju za učvršćivanje kapaciteta izvora obnovljive energije, vremensko razdvajanje, a moguće kao rezerva za sustav. Ako su spremnici dobro raspoređeni, onda se ti isti spremnici mogu koristiti za većinu distribuiranih radnji te održavanje razine napona.[2]

## **2.7. Regulacija frekvencije**

Regulacija frekvencije je vrlo slična regulaciji sustava, osim što reagira na potrebe sustava u kraćim vremenskim razdobljima reda veličine sekundi do manje od jedne minute, kada se pojavi nagli ispad proizvodne jedinice ili dalekovoda. Prvi odgovor u početnim sekundama je primarna kontrola frekvencije djelovanjem operatora sustava koji mijenja izlazne snage proizvodnih jedinica za povećanje njihove izlazne snage kao što je prikazano u donjem dijelu na slici 2.4. Nakon toga slijedi duže razdoblje trajanja sekundarne regulacije frekvencije, odgovora automatskog upravljanja proizvodnje (AGC) koja se proteže pola minute do nekoliko minuta što je prikazano crtkanom linijom u donjem dijelu slike 2.4. Važno je napomenuti da je stopa učestalosti pada frekvencije nakon događaja ispada generatora ili prijenosne mreže - izravno proporcionalna u odnosu na ukupnu inerciju unutar mreže u tom trenutku. Rotirajuća rezerva velikih generatora i agregata manje rezerve mnogo manjih generatora zajedno određuju ovu inerciju. Kombinirani učinak inercije i djelovanje regulatora određuje stopu propadanja frekvencije i oporavaka prikazanu u razdoblju nepovoljnog događaja i razdoblju početka regulacije u gornjem dijelu slike 2.4. To je ujedno i vremensko razdoblje u kojem se brzo-djelujući spremnici za pohranu električne energije kao što su zamašnjak i baterije ističu u stabiliziranju frekvencije.



**Slika 2.4 Prikaz uspostave frekvencije mreže nakon disbalansa**

Prisutnost brzo-djelujućih spremnika za pohranu osigurava glatki prijelaz iz pada frekvencije u razdoblje normalnog rada, ako se mrežna frekvencija vrati u svoj normalni raspon. Učinkovitost brzo-djelujućih spremnika za pohranu električne energije u ovom zahtjevu uspješno je korištena od strane mrežnog operatora. Veličina sustava za pohranu električne energije koji će se koristiti za regulaciju frekvencije je proporcionalna veličini mrežnog ili područnog uravnoteženja u kojima je potrebna. Općenito, sustavi za pohranu veličine 20 MW i veći mogu pružiti učinkovit odziv za regulaciju frekvencije zbog njihovog brzog djelovanja; neka istraživanja pokazuju da je odziv dvostruko učinkovitiji od konvencionalnih fosilnih elektrana, uključujući i elektrane s unutarnjim izgaranjem i elektrane na ugljen. Međutim, lokacija spremnika za pohranu električne energije unutar mreže s obzirom na druge proizvodnje, prijenosnu mrežu, i opterećenja predstavlja ključnu ulogu u učinkovitosti frekvencijske regulacije.[2]

## **2.8. Odgoda nadogradnje prijenosne mreže**

Odgoda nadogradnje prijenosne mreže omogućuje produljenje rada prijenosne mreže bez ulaganja u nadogradnju prijenosnog sustava, pomoću ugradnje spremnika električne energije relativno male veličine. Uzimajući u obzir da se povećanjem potrošnje vrh dijagrama opterećenja približava kapacitetu mreže odnosno prijenosnog voda. U nekim slučajevima, instalacija male količine spremnika za pohranu energije, u blizini čvora u kojem je preopterećena prijenosna mreža, može odgoditi potrebu za nadogradnju mreže na nekoliko godina.

Ključna je značajka da se mala količina prostora za pohranu može koristiti za pružanje dovoljnog kapaciteta kako bi odgodili potrebu za velikim paušalnim ulaganjem u prijenosnu mrežu. Na taj način smanjuje se ukupni trošak za potrošače, poboljšava iskoristivost prijenosne mreže, omogućuje korištenje kapitala za druge projekte, te smanjuje financijski rizik povezan s paušalnim ulaganjima. Naime, za većinu čvorova unutar prijenosnog sustava, najveća opterećenja javljaju se samo nekoliko dana u godini, samo nekoliko sati godišnje. Često se najveće godišnje opterećenje javlja na jedan određeni dan čije je vršno opterećenje nešto više od svih ostalih dana. Iako je naglasak za ovu primjenu odgoda nadogradnje prijenosne mreže, slično obrazloženje vrijedi i za produljenje života prijenosne opreme. To jest, ako se spremnik primjenjuje kako bi se smanjilo opterećenje na postojeću opremu kojoj se bliži kraj očekivanog trajanja, rezultat toga bi mogao biti da se produži vijek trajanja postojeće opreme. To može biti posebno zanimljivo za prijenosnu opremu koja uključuje starenje transformatora i podzemnih energetske kabela. Spremnik električne energije mora opsluživati zadano opterećenje, koliko god je to potrebno, kako bi opterećenje na prijenosnu opremu bilo ispod određenog maksimuma.[2]

## **2.9. Održavanje napona u distribuciji i odgoda nadogradnje distribucijske mreže**

Odgoda nadogradnje distribucijske mreže uključuje korištenje spremnika električne energije kako bi se odgodile ili izbjegle investicije koje bi inače bile potrebne za održavanje adekvatnog kapaciteta distribucijske mreže. Odgađanje nadogradnje može se postići i zamjenom starog ili preopterećenog postojećeg distribucijskog transformatora u trafostanici ili ponovno postavljanje distribucijskih vodova s većim prijenosnim kapacitetom. Kada se transformator mijenja s novim, većim transformatorom, njegova veličina se bira tako da zadovolji budući rast opterećenja u idućih 15 do 20 godina planiranog razdoblja. Tako je veliki dio ove investicije nedovoljno iskorišten za veći dio životnog vijeka nove opreme. Nadogradnja transformatora može se

odgoditi korištenjem sustava za pohranu električne energije, tako da se energija iz spremnika koristi tijekom razdoblja vršnog opterećenja, čime se produljuje radni vijek za nekoliko godina. Ako je sustav za pohranu kontejnerski, onda se može fizički preseliti u druge stanice gdje se dalje mogu odgađati slične nadogradnje određene trafostanicete time i dalje povećati povrat ulaganja. Posljedica ove strategije je da se smanji vjerojatnost neostvarivanja planiranog rasta opterećenja, što bi bila neisplativa investicija kada bi se uložilo u transformator većeg kapaciteta ili kada bise postavili vodovi s većim kapacitetom. To može biti slučaj kada veliki potrošač, kao što je trgovački centar ili stambena zgrada, kasni ili odustane od izgradnje nakon što je operator sustava izvršio proračun i nadogradnju mreže, uzimajući u obzir njihovu potrošnju. Sustav za pohranu koji se koristi za odgodu nadogradnje može istovremeno biti i naponska podrška distribucijskim vodovima. Operator distribucijskog sustava regulira napon unutar zadanih granica mijenjajući omjer transformacije na distribucijskim transformatorima ili uključanjem kondenzatora koji prati promjene opterećenja. To je osobito važno na dugim, radijalnim vodovima gdje se nalazi veliki teret, kao što su aparati za lučno zavarivanje. Također, fotonaponski sustav na stambenoj zgradi može biti uzrok neprihvatljivog porasta napona kod susjednih potrošača. Ove fluktuacije napona mogu biti učinkovito prigušene s minimalnim trošenjem energije iz spremnika električne energije.[2]

## **2.10. Kvaliteta električne energije**

Kvaliteta električne energije uključuje korištenje spremnika električne energije za zaštitu kupaca od kratkotrajnih događaja koji utječu na kvalitetu električne energije isporučene kupcu.

Neki parametri loše kvalitete električne energije uključuju sljedeće:

- Varijacije u veličini napona (npr. kratkotrajni špicevi ili propadi, dugotrajni porasti ili sniženja napona).
- Odstupanja od nazivne frekvencije 50 Hz na kojoj se isporučuje električna energija.
- Niski faktor snage (napon i struja nisu u fazi).
- Harmonici (tj. prisutnost struje ili napona na frekvencijama koje nisu primarne frekvencije).
- Poremećaji u opskrbi, bilo kojeg trajanja, od djelića sekunde do nekoliko sekundi.

Tipično trajanje pražnjenja kada se spremnik koristi za „popravljanje“ kvalitete električne energije kreće se u rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Sustav za pohranu prati kvalitetu električne energije i predaje energiju u mrežu kada je potrebno kako bi izgladio poremećaj, tako da se potrošaču isporuči energija zadanih parametara. Sustav za pohranu može



se učinkovito koristiti za napajanje potrošača kada dođe do prekida opskrbe električnom energijom iz mreže. Da bi spremnik mogao ispuniti taj zahtjev potrebno je da su sustav za pohranu i potrošač u otočnom radu tijekom nestanka napajanja te da se ponovno sinkroniziraju s mrežom kada se vrati napajanje. Kapacitet spremnika električne energije u odnosu na veličinu potrošača koji koristi energiju iz spremnika određuje vrijeme koliko dugo spremnik može napajati tog potrošača. To vrijeme se može produžiti tako da se uz spremnik za električnu energiju postavi još i dizelski agregat koji će nastaviti predavati električnu energiju potrošaču za ispade napajanja koji traju duže nego spremnik električne energije može predavati energiju potrošaču. Sustav za pohranu može biti u vlasništvu kupca i pod njegovom kontrolom u svakom trenutku. Alternativni scenarij može biti da je spremnik električne energije u vlasništvu operatora sustava i tretira se kao potrošač u sustavu, spremnik električne energije tada služi da zadovolji potrebe krajnjih potrošača.[2]

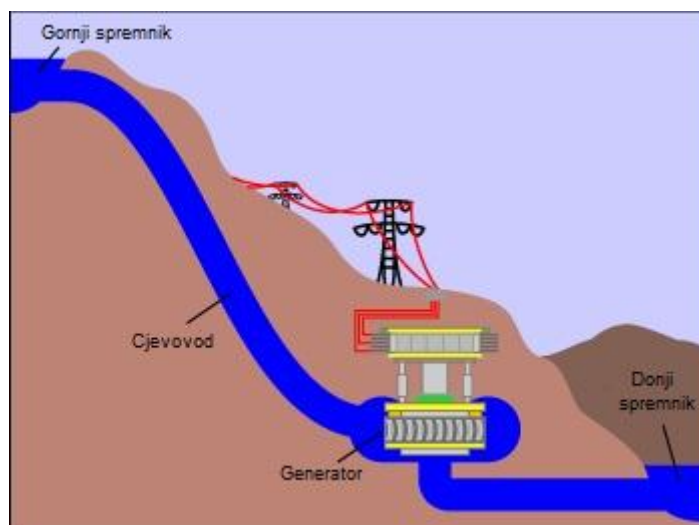
### **3. NAČINI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Pehrana električne energije se uglavnom vrši pretvaranjem električne energije u jedan od ostalih oblika energije, kao na primjer: potencijalnu energiju (reverzibilne elektrane), kinetičku energiju (zamašnjaci, spremnici s komprimiranim fluidom). A moguće je i pohranjivanje električne energije u izvornom obliku, pohranjujući je u „super kondenzatore“ i baterije velikog kapaciteta.

#### **3.1. Reverzibilne hidroelektrane**

„U razdoblju niske potražnje električne energije voda se crpi iz nižeg u viši spremnik vode. U razdoblju veće potražnje za električnom energijom voda se propušta, kroz turbinu natrag u niži rezervoar i pritom se proizvodi električna energija. Reverzibilna turbina/generator može se ponašati i kao crpka i kao turbina (obična Francis-ova turbina). Postoje postrojenja koja koriste napuštene rudnike kao donje spremnike, ali u većini slučajeva su to prirodni spremnici ili čak "umjetni" (iskopani) spremnici. Čiste reverzibilne hidroelektrane izmjenjuju vodu između dvaju spremnika, a kombinirane reverzibilne hidroelektrane ujedno proizvode električnu energiju kao konvencionalne hidroelektrane kroz energiju toka vode. Uzimajući u obzir gubitke uslijed isparavanja akumulirane vode i gubitke uslijed pretvorbe, približno 70% do 85% električne energije koja se koristi za pumpanje vode u viši spremnik može biti ponovno dobiveno. Sustav može biti vrlo ekonomičan jer poravnava razlike u opterećenju mreže, dozvoljavajući termoelektranama (npr. termoelektrana na ugljen), nuklearnim elektranama i obnovljivim izvorima energije da opskrbljuju sustav energijom. Ovo omogućuje da sustav radi s vršnom iskoristivošću, a da se pritom izbjegne rad na maksimalnom opterećenju gore navedenih elektrana. To za sobom povlači velike uštede na sve skupljim gorivima. No, investicijski troškovi za izgradnju spremnika s vodom su poprilično visoki. Zajedno s gospodarenjem i upravljanjem energijom, reverzibilne elektrane pomažu kontrolirati frekvenciju električne mreže i omogućuju stvaranje zaliha. Termoelektrane puno teže podnose iznenadne promjene električne potražnje, a ujedno mogu uzrokovati nestabilnost frekvencije i napona mreže. Reverzibilne elektrane, kao i ostale hidroelektrane, jako se dobro nose s promjenama opterećenja. Reverzibilne elektrane prvi put se pojavljuju 1890. godine u Italiji i Švicarskoj. Reverzibilne turbine su se pojavile tek 1930. godine. Takve turbine mogu raditi i u režimu generator i kao crpka pogonjena elektromotorom. Posljednja tehnologija na ovom polju su strojevi s varijabilnom (promjenjivom) brzinom vrtnje zbog veće učinkovitosti. Takvi strojevi proizvode električnu energiju u sinkronizaciji s frekvencijom mreže, ali djeluju asinkrono kao crpka. Na slici 3.1 je prikazana reverzibilna hidroelektrana. Danas se reverzibilne hidroelektrane koriste

kako bi se izjednačila nepredvidiva proizvodnja obnovljivih izvora energije. Reverzibilne hidroelektrane apsorbiraju opterećenje u razdobljima visoke proizvodnje i niske potražnje. U nekim slučajevima, cijene električne energije mogu biti blizu nule ili povremeno čak i negativne (Ontario, početkom rujna 2006.). To pokazuje da postoji više električne energije nego što opterećenje može apsorbirati. Iako, se to događa samo zbog vjetra. Što se više struje dobije iz vjetra, mogućnost za takvo što je veća. Moguće je da će sustavi s reverzibilnim elektranama postati posebno važni kao uravnoteženje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije.“[1]



**Slika 3.1 Prikaz reverzibilne hidroelektrane[3]**

### **3.2. Spremnici s komprimiranim fluidom**

„Sustavi skladištenja energije komprimiranim zrakom na razini gradske primjene postoje od 1870. godine. Gradovi poput Pariza u Francuskoj, Birminghama u Engleskoj, Dresdena, Rixdorfa i Offenbacha u Njemačkoj te Buenos Airesa u Argentini koriste ovakve sustave. Victor Popp konstruirao je prve ovakve sustave kako bi pogonili satove pomoću udara zraka koji bi svake minute pomicao kazaljke. Sustavi su ubrzo razvijeni kako bi dovodili energiju kućanstvima i industrijskim postrojenjima. Tako, od 1896. g. Pariz ima sustav snage 2,2 MW koji razdjeljuje zrak tlaka 5,5 bara preko 50 km cijevi za motore na stlačeni zrak za potrebe lake i teške industrije. Potrošnja se mjerila u metrima. Ovakav sustav bio je glavni izvor energije u kućanstvima u tadašnje vrijeme, a uz to pogonio je uređaje i strojeve zubara, krojačnica, tiskarskih preša i pekara.

- 1978- Prvi projekt skladištenja energije komprimiranim zrakom na uslužnoj razini bilo je postrojenje Huntorf snage 290 MW u Njemačkoj koje je koristilo solnu kupolu za spremanje energije.
- 1991- Postrojenje snage 110 MW s kapacitetom od 26 sati sagradio je McIntosh u saveznoj državi Alabami u SAD-u. To postrojenje koštalo je 65 milijuna dolara, a proizvede 1KWh za 550 dolara, koristeći pećinu nastalu otapanjem soli veličine 1 765 000 metara kubnih pri tlaku od 76 bara. Iako je iskoristivost kompresije približno 82%, pri širenju je potreban dodatni izvor topline da proizvede istu količinu električne energije kao i plinska turbina.
- Studeni 2009.- Ministarstvo energije SAD-a dodijelilo je nagradu u iznosu od 24,9 milijuna dolara za prvu fazu postrojenja snage 300 MW, vrijednog 356 milijuna dolara, tvrtki Pacific Gas and Electric za objekt koji koristi slane porozne formacije stijena koji se razvija u blizini Bakersfielda u Kern Countyu u saveznoj državi Kaliforniji. Cilj ovog projekta je izgradnja i testiranje naprednih projekata.
- Prosinac 2010- Ministarstvo energije SAD-a osigurava 29,4 milijuna dolara za početak pripremnih radova na projektu skladištenja energije komprimiranim zrakom snage 150 MW temeljenom na otapanju soli, koje razvija tvrtka Iberdrola USA u gradu Watkins Glen u saveznoj državi New York. Cilj ovog projekta je ugraditi tehnologiju pametne mreže da uravnoteži prekide snabdijevanja obnovljivih izvora energije.
- 2013. -Prvi projekt skladištenja energije komprimiranim zrakom koji koristi adijabatski proces, postrojenje imena ADELE snage 200 MW, treba započeti s izgradnjom u Njemačkoj.
- 2016. (planirano)- Tvrtka Apex planira pustiti u pogon svoje postrojenje na komprimirani zrak, u Anderson Countyu u saveznoj državi Texas.

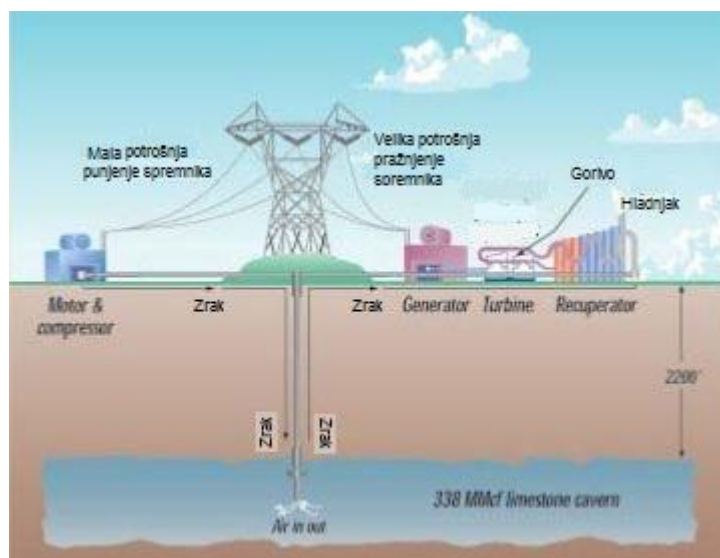
Kompresija zraka stvara toplinu, tj. zrak je topliji nakon kompresije. Za širenje zraka potrebna je toplina. Ako se toplina ne doda, zrak će biti puno hladniji nakon širenja. Kada bi se toplina generirana tijekom kompresije mogla spremiti i upotrijebiti tokom širenja, iskoristivost pohrane značajno bi narasla. Postoje tri načina na koji se sustav može odnositi prema toplini. Pohrana zraka može biti adijabatska, dijabatska i izotermna.“[4]

Pohrana izotermnim procesom

„Izotermna kompresija i ekspanzija približava se pokušaju održavanja radne temperature pomoću konstantne izmjene topline s okolišem. Ovi procesi praktični su samo pri

niskoenergetskim razinama, bez visoko efektivnih izmjena topline. Teoretska iskoristivost izoternnog skladištenja energije teži 100% sa savršenom izmjenom topline s okolišem. U praksi, nijedan od ovih procesa nije moguć jer se neki gubici topline ne mogu izbjeći. U izoternnom procesu kompresije, temperatura plina u sustavu je stalna tokom izvođenja procesa. Za ovakav proces nužno je uklanjanje topline od plina jer bi u suprotnom temperatura plina rasla zbog energije koju kompresor predaje plinu. Uklanjanje topline moguće je postići izmjenjivačima topline (međuhlađenjem) između pojedinih procesa kompresije. Da bi se izbjegli gubici energije, hladnjaci moraju biti optimizirani za visoko toplinske prijenose te male padove tlaka. Ovo je samo aproksimacija pravog procesa jer pravi izotermni proces traje beskonačno dugo, tj. izmjena topline i kompresija se odvijaju u jako malim pomacima. Za neke manje kompresore, moguća je kompresija približno izoternnim procesom bez korištenja hladnjaka zbog omjera površine i volumena te poboljšavanja rasipanja topline kroz tijelo kompresora.

U praksi se rezervoaru volumena  $V$  dodaje stlačeni zrak iz okoline. U idealnom slučaju možemo pohraniti energiju  $E = pV \ln\left(\frac{p}{p_{atm}}\right)$  jednaku energiji idealnog plina pri tlaku  $p$ , gdje je  $p_{atm}$  atmosferski tlak. Kao spremište stlačenog zraka može se koristiti prostor podzemnih špilja ili starih rudnika. Na ovaj način radi reverzibilna termoelektrana E.N. Kraftwerk Huntorf u Njemačkoj snage 290 MW i termoelektrana Alabama Electric Corporation u McIntosh, Alabama, USA, snage 110 MW. Na slici 3.2 prikazan je princip rada spremnika s komprimiranim zrakom.“[4]



**Slika 3.2 Princip rada spremnika sa komprimiranim zrakom**

Pohrana adijabatskim (izentropskim) procesom

„Adijabatska pohrana zadržava toplinu dobivenu kompresijom i vraća ju zraku kada je potrebno širenje radi proizvodnje energije. Teoretska iskoristivost adijabatskog procesa sa savršenom izolacijom teži k 100% , ali u praksi, očekivana sveukupna iskoristivost je 70%. Toplina se može spremati u krutom tijelu kao npr. betonu ili kamenu ili vjerojatnije u tekućini kao npr. vrućem ulju (na temp. od 300°C) ili rastaljenim slanim otopinama (na temp. od 600°C).

Adijabatski proces je proces kod kojeg nema izmjene topline između spremnika i okoliša. Ako je proces još i ravnotežan onda se kaže da je izentropski. Adijabatski proces pohrane funkcionira bez upotrebe međuhladnjaka tokom procesa te time dopušta plinu da se zagrije tokom kompresije, a ohladi tokom ekspanzije. Ovakav pristup je privlačan jer izbjegava gubitke vezane za prijenos topline. Jedina mana ovog procesa je da spremnik treba imati dovoljno dobru izolaciju kako bi se spriječio gubitak topline. Važno je napomenuti da stvarni kompresori i turbine nisu izentropski, ali im je izentropska iskoristivost približno 85%. Iz čega slijedi da je sveukupna iskoristivost pohrane adijabatskih sustava značajno manja od 100%. Adijabatska pohrana rasipa višak topline pomoću hladnjaka (na taj se način približava izotermnoj kompresiji) u okoliš kao otpad. Nakon što se višak topline ukloni iz spremnika, zrak je potrebno ponovno zagrijati prije širenja u turbini koja pogoni generator. Zbog gubitka topline smanjuje se iskoristivost, ali ovaj pristup je jednostavniji i time jedini takav sustav koji je doživio komercijalnu upotrebu.[4]

Termodinamika velikih sustava pohrane

Sustavi energetske pohrane često koriste velike podzemne pećine. To je preferirana konstrukcija sustava zbog jako velikih volumena, a time i velike količine energije koje se mogu spremati s relativno malom promjenom tlaka. Prostor pećine se lako izolira, adijabatskom kompresijom pomoću male promjene temperature (čime se približava reverzibilnom izotermnom procesu) te malim gubitkom topline (čime se približava izentropskom procesu). Ova prednost te mali troškovi gradnje omogućuju izgradnju spremnika, koristeći zidove za zadržavanje pritiska.

Nedavno su razvijeni izolirani podvodni zračni jastuci sa sličnom termodinamikom procesa kao kod velikih sustava pohrane u podzemnim pećinama.“[4]

### **3.3. Zamašnjak**

„Zamašnjak najčešće vežemo uz industrijsku revoluciju i zastarjelu tehnologiju. Međutim, zamašnjaci koje trenutno razvija NASA s ciljem pohrane energije u obliku kinetičke energije vrtnje zamašnjaka, rezultat su vrhunske tehnologije. Slika jednog takvog modula i zamašnjaka je prikazana na slici 3.3. To su valjci izrađeni od posebnog materijala koji lebde na magnetskim

ležajevima u vakuumu i okreću se frekvencijom i do 1000 okretaja u sekundi. Uz takvu frekvenciju akceleracija na udaljenosti od  $r = 25\text{cm}$  od središta vrtnje iznosi čak  $a = r\omega^2 = 106g$ . Uz elektromagnetski prijenos energije, zamašnjaci omogućuju izuzetnu efikasnost i visoku gustoću energije. Pohranjena energija  $E = \frac{I\omega^2}{2}$  proporcionalna je momentu inercije  $I$  i kvadratu kutne brzine  $\omega$ . Zbog toga je povoljnije koristiti čvršći materijal uz veću kutnu brzinu nego materijal velike gustoće. Vidimo odmah da treba odabrati materijal koji, bez deformacije, može izdržati što veće naprezanje. Za izradu zamašnjaka se, zbog toga, koriste relativno lagani kompozitni materijali.“[5]

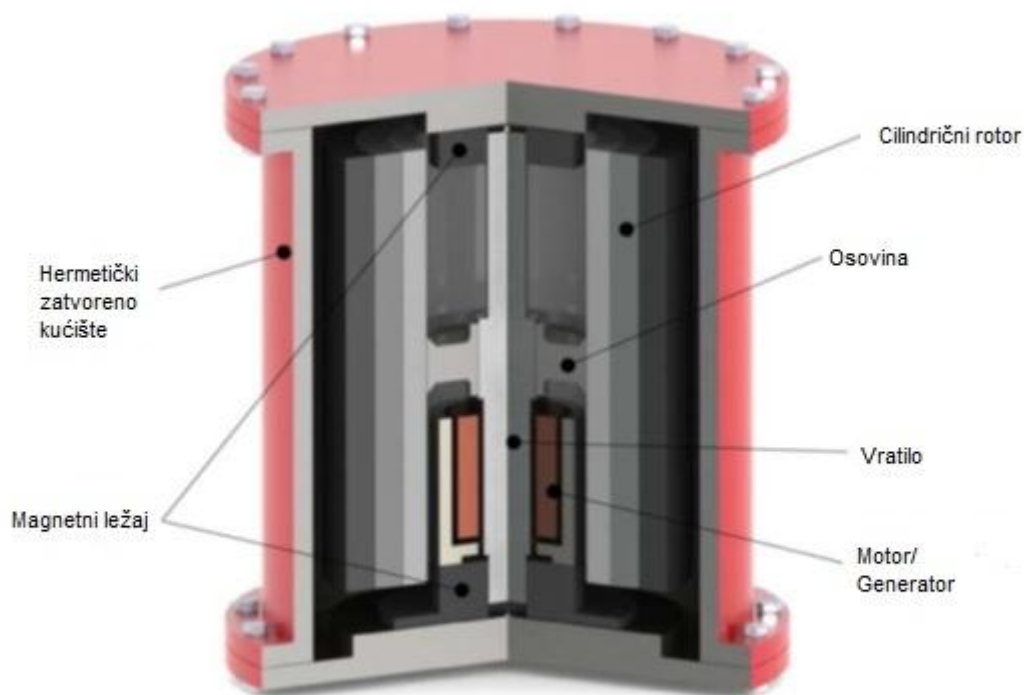


**Slika 3.3 Prikaz flywheel modula i zamašnjaka**

G2 Flywheel modul i zamašnjak radi pri frekvenciji od 30000 okr/min. Modul odlikuje dugo vrijeme života, visoka gustoća energije 0,5 MJ/kg, te velika izlazna snaga 3-133 kWh, i efikasnost od 90%.[4]

„Zamašnjak je rotirajući mehanički uređaj koji se koristi za spremanje mehaničke (rotacijske) energije. Ima veliki moment inercije zbog čega vrlo polako usporava. Energija se zamašnjaku dovodi pomoću vanjskog momenta i tada zamašnjak ima ulogu motora. Kada zamašnjak daje

energiju, ima ulogu generatora, daje moment teretu i smanjuje mu se brzina vrtnje. Tipični zamašnjak se sastoji od rotora kojeg drže ležajevi u vakuumskoj komori (kako bi se smanjilo trenje, odnosno usporavanje rotora). Rotor je vratilom spojen s električnim motorom/generatorom. Poprečni presjek zamašnjaka prikazan je na slici 3.4.“[6]



**Slika 3.4 Poprečni presjek zamašnjaka**

Brzina vrtnje iznosi nekoliko tisuća okretaja u minuti. Moderni zamašnjaci načinjeni su od karbonskih vlakana, koriste vakuum, imaju magnetske ležajeve i mogu se vrtjeti brzinama do 60-000 okretaja u minuti. Zamašnjaci imaju preko 100 000 ciklusa pražnjenja. Najprimjenjiviji su u okruženju koje zahtijeva veliku snagu i malu energiju u čestim ciklusima.

Prednosti zamašnjaka:

- Brz odziv
- Brze promjene snage (ramp rate)
- Regulacija frekvencije
- Regulacija napona
- Sekundarna regulacija [5]

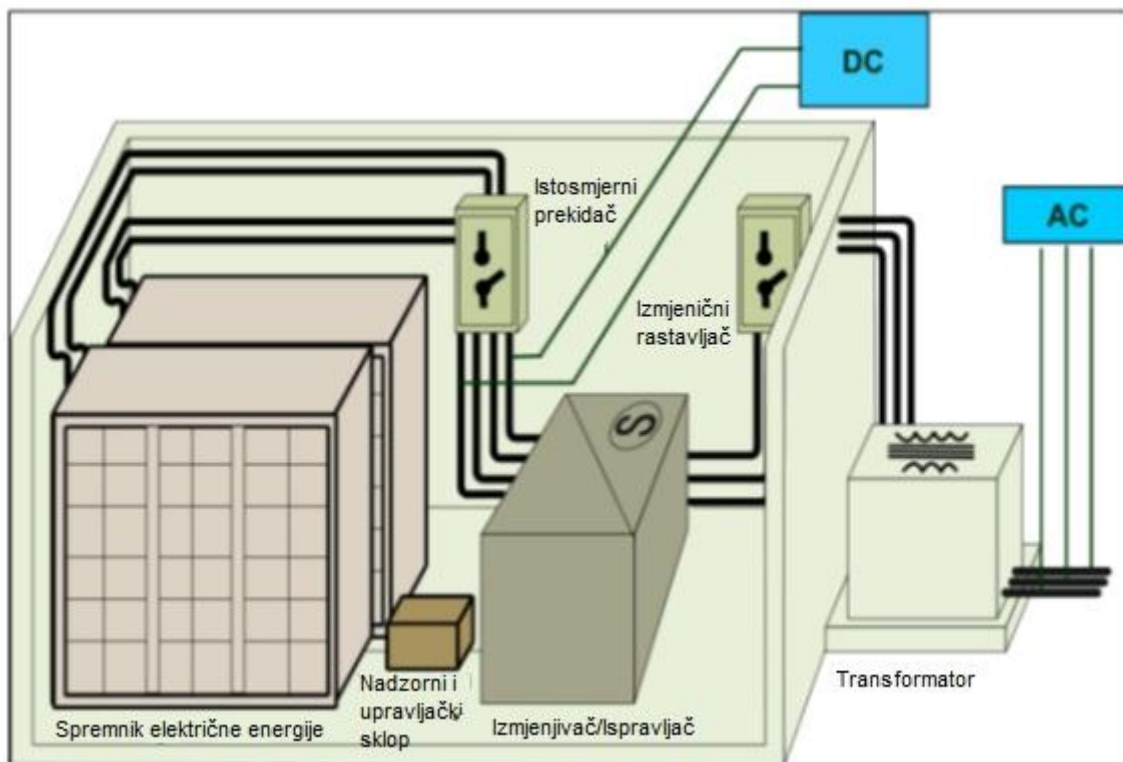


Energetski zamašnjaci obično se proizvode s kompozitnim rotorom zatvorenim u vakuum, s magnetskim ležajevima. Sustavi koji koriste zamašnjak kao spremnik električne energije obično mogu pohraniti između 0,5 kWh i 10 kWh. Najveći komercijalno dostupni sustavi ovog tipa su u rasponu od 2 do 6 kWh, a planira se proizvesti sustav s kapacitetom do 25 kWh. Svi energetski zamašnjaci koji se proizvode u današnje vrijeme daju istosmjernu električnu struju na izlazu. Učinkovitost energetskih zamašnjaka je obično između 70% i 80%. Gubici dok zamašnjak čeka da preda energiju nazad u sustav su vrlo mali, obično manje od 25 W/kWh odnosno u rasponu jedan do dva posto nazivne izlazne snage spremnika. Zamašnjak se može puniti relativno brzo. Vrijeme punjenja je usporedivo s vremenom pražnjenja. Sustavi pohrane velike snage koji koriste zamašnjak često mogu isporučiti svoju energiju i opet se napuniti u sekundi, ako je dostupna odgovarajuća snaga koja je potrebna za punjenje. Zamašnjaci općenito imaju duži životni vijek u usporedbi s drugim sustavima za pohranu energije. Većina zamašnjaka ima životni vijek od preko 100 000 potpunih punjenja i pražnjenja. Rotor predstavlja dio koji se najviše troši tijekom čestih punjenja i pražnjenja. Znatno napor se koristi kako bi se izradili zamašnjaci koji su sigurni za upotrebu u različitim uvjetima. Najistaknutiji sigurnosni problem kod zamašnjaka je kvar na rotoru zamašnjaka dok se okreće. U velikim, masivnim rotorima, kao u onima koji su izrađeni od čelika, kvar rotora obično proizlazi iz širenja pukotina kroz rotor, što kod velikog broja zamašnjaka uzrokuje prekid rotacije. Osim ako je zamašnjak pravilno zaštićen, ova vrsta kvara može uzrokovati oštećenja na okolnoj opremi i ozlijediti ljude u blizini. Velike čelične zaštite se koriste kako bi se spriječili fragmenti koji se velikom brzinom kreću iz zamašnjaka u slučaju kvara. Današnji sustavi za pohranu sa zamašnjakom ne mogu pohraniti mnogo energije i općenito nisu pogodni za mrežnu podršku koja zahtijeva veće količine pohranjene energije. Zamašnjak se puni trošenjem električne energije iz mreže te ju koristi za povećanje brzine vrtnje, a pražnjenjem proizvodi električnu energiju kako se rotacija usporava. Imaju vrlo kratko vrijeme odziva od četiri milisekundi ili manje, mogu biti veličine između 100 kW i 1650 kW, a mogu se koristiti za kratke periode do jednog sata. Zamašnjaci imaju vrlo visoku učinkovitost od oko 93%, a životni vijek im se procjenjuje na 20 godina. Iako zamašnjaci imaju veću gustoću energije za do 5 do 10 puta od baterije, odnosno zamašnjaci zahtijevaju puno manje prostora za pohranu jednake količine energije, ipak postoje praktična ograničenja za količinu energije koju zamašnjaci mogu pohraniti. Kapacitet spremnika električne energije koji koriste zamašnjak mogu se povećati tako da se doda više spremnika sa zamašnjakom. Zamašnjak se obično primjenjuje za popravljivanje kvalitete napona, te za UPS (uninterruptible power supply). Istražuje se kako razviti napredniji sustav koji koristi zamašnjak kako bi se mogla

pohraniti velika količina energije. Zbog toga što su sustavi sa zamašnjakom učinkoviti i imaju malo vrijeme odziva, oni se trenutno koriste kako bi operatoru sustava omogućili uslugu regulacije frekvencije. Tu su i brojne druge primjene za koje se predlaže da se koristi zamašnjak kao medij za pohranu energije. Kao na primjer kontrola uklopa, regulacija napona i stabilizacija trafostanica za tramvaj ili trolejbus, i stabilizacija proizvodnje vjetra. Većina proizvoda trenutno na tržištu od strane nacionalnih i međunarodnih poduzeća koristi se za povećanje kvalitete električne energije.[2]

### **3.4. Baterijski spremnici električne energije**

„U baterijama, energija je pohranjena u obliku kemijske energije. Jedan od sastavnih atoma baterije kemijski može biti vezan na dva različita načina. Jedna od veza ima višu energiju, pa atom spontano želi prijeći u stanje niže energije, tj. prijeći iz jedne veze u drugu. Kada bi ove kemijske spojeve doveli u neposredni kontakt, kemijska reakcija odvila bi se brzo, a energija bi se oslobodila naglo u vidu topline. U bateriji ovi su spojevi prostorno razdvojeni, a kemijska energija oslobađa se kontrolirano, tako da atom po atom putuje od jednog spoja do drugog. Baterija se sastoji od elektroda i elektrolita. Atom o kojem je riječ putuje s jedne elektrode na drugu. On to radi tako da se ionizira, pa njegov elektron prolazi kroz vanjski krug baterije, a pozitivni ion kroz samu bateriju, odnosno kroz elektrolit. Na drugoj elektrodi elektron i ion se ponovo spoje u atom, pri čemu se atom veže u novi spoj. Elektron u vanjskom krugu može izvršiti korisni rad. Energije kemijske veze su reda veličine 1eV, pa baterije imaju napon oko 1V.“ Prikaz rada istosmjernog spremnika električne energije je na slici 3.5[5]



**Slika 3.5 Princip rada istosmjernog spremnika električne energije**

Istosmjerni spremnici električne energije oslanjaju se na uređaje energetske elektronike - invertore da bi izmjeničnu struju pretvorili u istosmjernu kod pohrane, odnosno obratno kod korištenja energije iz spremnika.

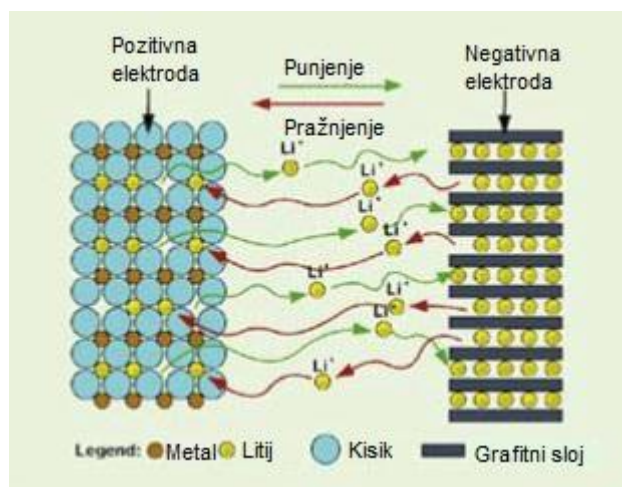
Tehnologije izrade stacionarnih baterija:

- **Li-ion**

U posljednjih sedam godina Li-ionska tehnologija se izdvaja kao brzorastuća platforma za primjenu kod stacionarnih spremnika električne energije. Već se koriste komercijalno za uređaje potrošačke elektronike, Li-ion se pozicionirao kao vodeća tehnološka platforma za plug-in hibridna električna vozila (PHEVs) i električna vozila, koja koriste baterije s kapacitetom od 15 do 20 kWh za hibridna električna vozila i do 50 kWh za električna vozila.

Litij ionska baterija prikazana je na slici 3.6. Atom litija rado se kemijski veže na metalni oksid pa je jedna elektroda napravljena od metalnog oksida. Druga elektroda je od grafita. Prilikom nabijanja baterije ion litija odvaja se od elektrode metalnog oksida, prolazi kroz elektrolit i ulazi između grafenskih ravnina na grafitnoj elektrodi gdje se neutralizira primanjem elektrona iz vanjskog kruga. Prilikom izbijanja litij se ponovo ionizira i spontano vraća na početnu elektrodu.

Tamo se kemijski veže oslobađajući energiju kemijske veze. Njegov elektron ga slijedi putujući u vanjskom krugu.[3]



**Slika 3.6 Princip rada litij-ionske baterije**

Li-Ion baterijska ćelija sadrži dvije reaktivne tvari koje prolaze kroz kemijsku reakciju prijenosa elektrona. Da bi se dogodila reakcija, materijali moraju biti povezani jedni s drugima električno i moraju biti sposobni razmijeniti nabijene ione, te održavati ukupnu neutralnost kako se elektroni prenose. Ćelija baterije je dizajnirana tako da su materijali s direktnim kontaktom međusobno povezani i svaki materijal je povezan na električni terminal izoliran od terminala drugog materijala. Ovi terminali ćelija su vanjski kontakti baterije. Unutar ćelije, materijali su ionski, ali ne i električni povezani elektrolitom koji može provesti ione, ali ne i elektrone. To se postiže ugradnjom ćelije sa poroznom izolacijskom membranom, koja se naziva separator. Tako ovaj elektrolit može poslužiti kao put za ione, ali ne i za elektrone. Kada su vanjski polovi baterije spojeni jedan s drugim preko tereta tada postoji put i za elektrone između materijala, a kemijska reakcija odvija se s karakterističnom elektrokemijskom razlikom potencijala ili naponom. Prema tome, postoje struja i napon (tj. snaga) koja se predaje teretu.

#### Komercijalna upotreba

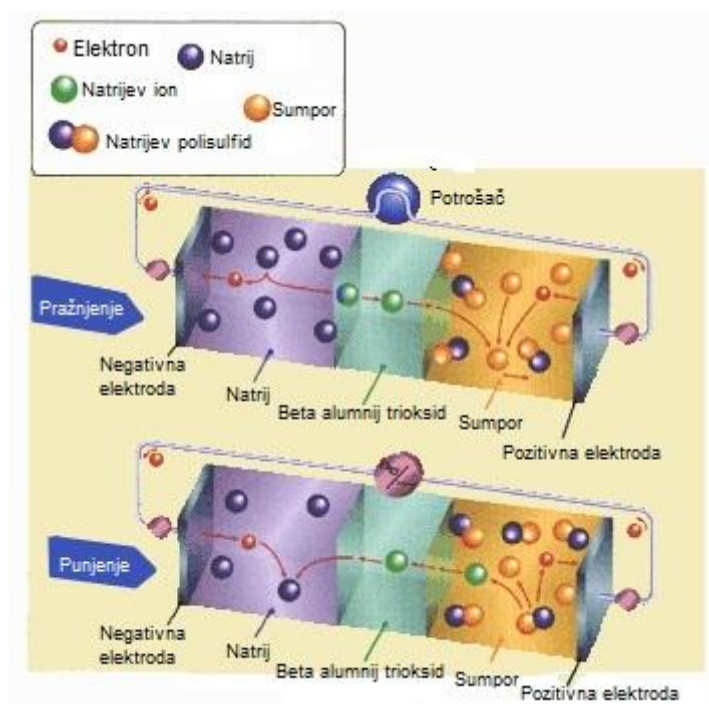
Rano ispitivanje sustava u tijeku koristi male 5 do 10 kWh / 20-kWh distribuirane sustave i velike gustoće energije 1 MW/15-minuta brzo reagirajući sustav za regulaciju frekvencije.

Nekoliko električnih operatora također planira implementaciju distribuiranih energetske sustava za pohranu u rasponu veličina od 25 do 50 kW na strani proizvodnje koji bi napajali mrežu u vremenskom rasponu od 1 do 3 sata. Neki sustavi su sposobni za otočni rad, koji može napajati potrošače 1 do 3 sata, ako dođe do prekida opskrbe u tom dijelu mreže. Operatori sustava također uvode jedinice koje omogućuju integraciju fotonaponskih sustava i omogućuju podršku

distribucijskoj mreži. Ukupno više od 100 MW spremnika električne energije s tehnologijom litij-ionskih baterija se koristi za demonstraciju i komercijalne usluge.[2]

- **Natrij sumpor baterija (NaS)**

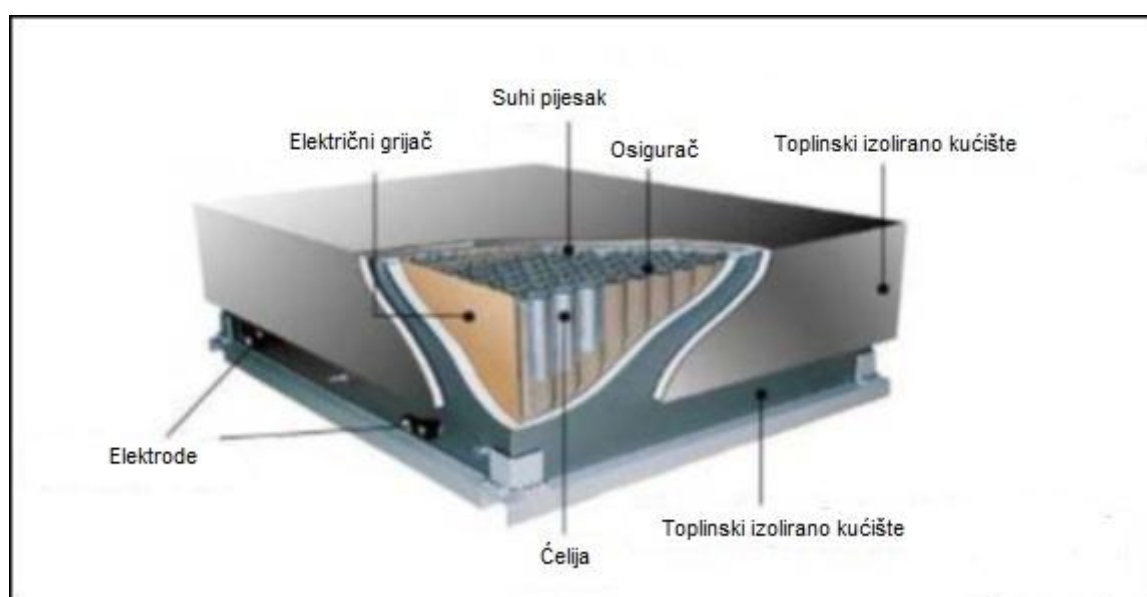
NaS baterija je vrsta "suhe" baterije i sastoji se od pozitivne elektrode sumpora, i negativne elektrode natrija, te keramičkog elektrolita beta aluminij trioksida, koji ima svojstva provođenja natrijevih iona i koji se nalazi između elektroda. Sve je to oklopljeno u metalnom kućištu i održavano pod radnom temperaturom od oko 300°C. U takvim uvjetima, elektrolit je u čvrstom stanju, a aktivne elektrode su u tekućem stanju. Za vrijeme pražnjenja baterije odnosno korištenja energije, ioni natrija prelaze iz negativne elektrode kroz elektrolit i zaustavljaju se na pozitivnoj elektrodi sumporu. Strujni krug se zatvara kroz strujni krug potrošača energije. Za vrijeme punjenja baterije vanjski narinuti napon, uvjetuje proces suprotan onom opisanom pri pražnjenju i na taj način puni bateriju električnom energijom. Princip rada NaS baterije je na slici 3.7.



**Slika 3.7 Princip rad NaS baterije**

Za praktičnu primjenu, kada se zahtijeva veliki kapacitet baterije, veći broj ćelija spoji se u jednu cjelinu. Tako oklopljeni čelični sklop pogodan je za ugradnju u raznim uvjetima. Natrij-sumpor (NaS) baterije su komercijalna tehnologija za pohranu energije koja se primjenjuje za podršku distribucijske električne mreže i integraciju vjetroelektrana. NaS tehnologija ima potencijal za korištenje, zbog svojeg dugog pražnjenja (oko 6 sati). Kao i mnoge druge tehnologije za pohranu

električne energije, NaS baterije su sposobne za brz, odziv na potrebe mreže što pridonosi poboljšanju kvalitete električne energije i odgovora na signal automatske regulacije za područje regulacije. Normalna radna temperatura NaS ćelija tijekom ciklusa pražnjenja/punjenja kreće se u rasponu od 300 °C do 350 °C. NaS baterije koriste opasne materijale, uključujući metalni natrij, koji je zapaljiv ako se izloži vodi. Dakle, kućište NaS baterije je hermetično, s dvostrukom stjenkom od nehrđajućeg čelika koji sadrže serijsko-paralelne nizove NaS ćelija. Svaka ćelija je hermetički zatvorena i okružena s pijeskom kako bi ćelija bila učvršćena te kako bi spriječili požar, kao što je prikazano na slici 3.8. Druge sigurnosne značajke uključuju električnu izolaciju i sustav upravljanja baterije koje nadzire napon i temperaturu ćelije.



**Slika 3.8 Presjek jedne NaS baterije**

NaS baterije mogu biti instalirane u postojeće elektrane, trafostanice, i na području obnovljivih izvora energije gdje se baterije pune tijekom sati male potrošnje, a prazne se kada je to potrebno. Baterijski moduli sastoje se od ćelija, grijača i suhog pijeska. Neke od tehničkih karakteristika natrij sumpor baterije prikazane su u tablici 1.

Gustoća energije (volumen)	170 kWh/m <sup>3</sup>
Gustoća energije (masa)	117 kWh/t
Efikasnost punjenja/pražnjenja baterije	>86%
Efikasnost punjenja/pražnjenja sustava	>74%
Životni vijek ciklusa	4500 ciklusa s nazivnim kapacitetom

Životni vijek	15 godina
---------------	-----------

Tablica 1. Karakteristike NaS baterija koje daje proizvođač.

#### Komercijalna upotreba

NaS baterija koja pruža funkcionalni ekvivalent od oko 160 MW reverzibilne hidroelektrane trenutno se nalazi u Tokiju. NaS baterije su dostupne samo u višekratnicima od 1-MWh i 6-MWh jedinicama s instalacijama obično u rasponu od 2 do 10 MW. Najveća pojedinačna instalacija je 34 MW Rokkasho koje se koriste za stabilizaciju vjetroelektrane u sjevernom Japanu koja je u radu od 1. kolovoza 2008. [2]

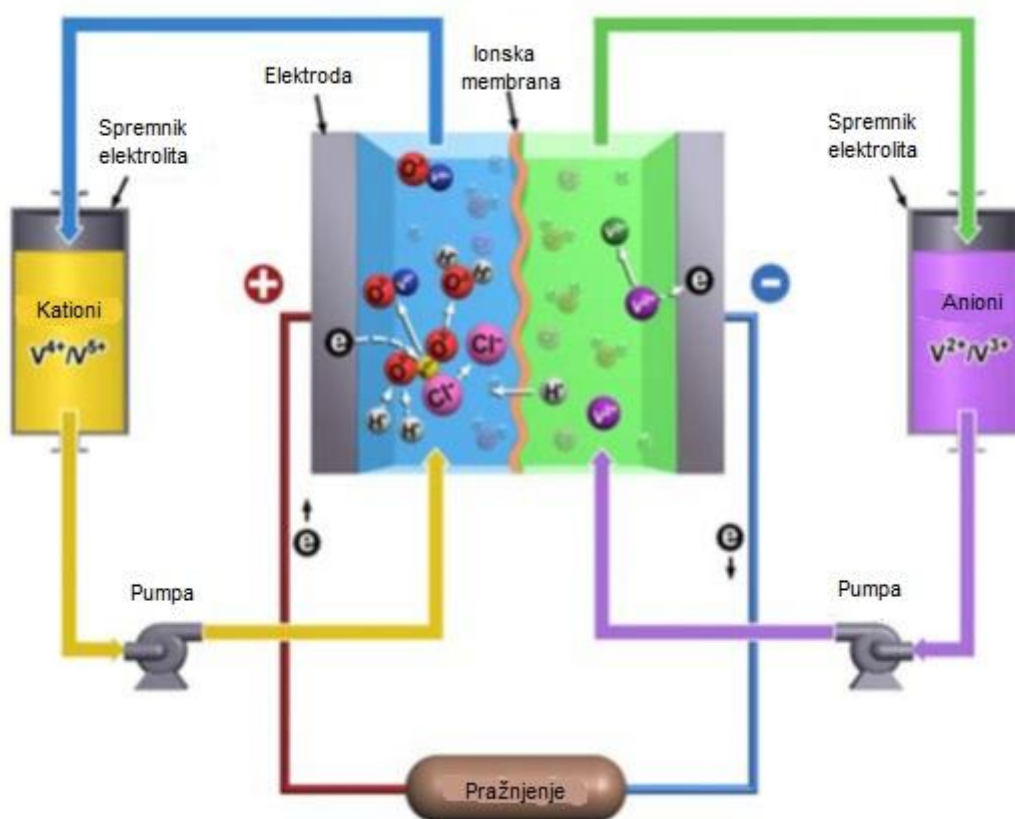
#### • Vanadij-redox protočna baterija

Vanadij redox protočna baterija (VRFB) je elektro-kemijska ćelija, podijeljena ionskom membranom na dva dijela. U svakoj polovici ćelije se nalaze vanadij sulfat elektroliti. Elektroliti u oba dijela se pumpaju preko dva posebna spremnika (negativni i pozitivni). Može se puniti i izmjeničnom i istosmjernom strujom; može isporučiti izmjeničnu i istosmjernu struju te može bez indukcije da transformira napon i frekvenciju izmjenične struje. Srednje vanadij redox baterije (10-100kW) mogu da pokriju maksimalnu potražnju liftova i industrijskih postrojenja za električnom energijom, pohranjuju električnu energiju iz solarnih elektrana, elektrana na vjetar i malih hidroelektrana za nezavisnu opskrbu udaljenih objekata energijom iz obnovljivih izvora i omogućavaju brzo punjenje vozila na električni pogon i čamaca (stanica za napajanje električnih vozila na solarni pogon). Velike vanadij redox baterije (>100kW) omogućavaju elektranama da funkcioniraju uz prosječnu potrošnju, a visoka potrošnja se sprječava vanadij redox baterijom odgovarajuće veličine. To omogućava da elektrane rade efikasnije i štede energiju. Pri korištenju solarne i energije vjetra, vanadij redox baterija garantira da mreži može isporučiti izmjeničnu struju sa stabilnom frekvencijom.[6]

Vanadij redox (redukcija i oksidacija) baterije poznatije kao protočne baterije, u kojoj su jedna ili obje aktivne tvari u elektrolitskoj otopini u svakom trenutku. U tom slučaju, ioni vanadija ostaju u kiselj otopini tijekom cijelog procesa. Vanadij redox baterija se temelji na redukciji kisika reakcija različitih ionskih oblika vanadija. U izgradnji, polovi ćelija odjeljuje se membranom koja omogućuje izmjenu protona i protok ionskih naboja zatvarajući strujni krug. I negativni i pozitivni elektrolit sastoje se od vanadija i mješavine sumporne kiseline približno iste kiselosti kao ona koja se nalazi u olovnom akumulatoru. Elektroliti su pohranjeni u vanjske spremnike te



se prema potrebi pumpaju u ćelije što je prikazano na slici 3.9. Pojedinačne ćelije imaju nazivni napon praznog hoda oko 1,4 V. Da bi se postigli veći naponi, ćelije se spajaju u seriju. Vanadij redox protočne baterije imaju važnu prednost u odnosu na ostale protočne baterije: obadva elektrolita su jednaka kada je baterija potpuno ispražnjena. To čini prijevoz i skladištenje jednostavnim i jeftinim. Samopražnjenje obično nije problem za vanadij redox sustave, jer su elektroliti pohranjeni u posebnim spremnicima. Samopražnjenja se mogu pojaviti unutar skupine ćelija, ako je skupina ispunjena nabijenim elektrolitom, što će rezultirati gubitkom električne energije i stvaranjem toplinske energije u toj skupini. Iz tog razloga, skupine se obično izdižu iznad spremnika, tako da se elektrolit odvodi natrag u spremnik kada se pumpe isključe. Alternativno, pumpe mogu raditi u praznom hodu, što će omogućiti da nabijeni elektrolit bude dostupan u svako doba, što povećava parazitske gubitke. Životni vijek vanadij redox sustava određuje broj komponenata. Skupine ćelija imaju ograničen životni vijek komponente, s vijekom trajanja koji se procjenjuje na približno 10 godina.[2]



**Slika 3.9 Princip rada vanadij redox baterije**

Prilikom stavljanja izvan pogona vanadij redox sustava, čvrste membrane za ionsku izmjenu iona mogu biti jako kisele i lužnate stoga i otrovne. One bi trebale biti zbrinute na isti način kao i ostale korozivne tvari. Ako je moguće, tekući elektrolit se reciklira. Vanadij se odvaja iz



elektrolita prije daljnje obrade tekućine. U tijeku su istraživanja kako bi se utvrdili točni faktori rizika za okoliš za vanadij.[2]

- **Cink brom baterija**

Cink-brom baterija je još jedan tip protočne baterije u kojoj je cink čvrst prilikom punjenja, a u tekućem stanju prilikom pražnjenja. Brom je uvijek u tekućem stanju. Svaka ćelija se sastoji od dvije elektrode i dva elektrolita koji su odvojeni mikro-poroznim tankim slojem. Oba elektrolita su vodene otopine cink broma ( $\text{ZnBr}_2$ ). Tijekom punjenja, cink se kreće na negativnu elektrodu. Brom se kreće na pozitivnu elektrodu. Idealno, brom ostaje samo u pozitivnom elektrolitu. Elektrode ćelija su napravljene od kompozita ugljika i plastike i dizajnirani su da budu bipolarne. To znači da svaka elektroda služi kao katoda za jednu ćeliju, a anoda za sljedeću ćeliju u seriji. Kompozit ugljika i plastike mora se koristiti zbog vrlo korozivne prirode broma. Ima sklonost da napadne sve komponente cink-brom sustava koji su mu izloženi. Prošli kvarovi uključuju oštećene brtve, koroziju kolektora i izgrebene elektrode. Aktivne tvari ne degradiraju same od sebe. Značaj ove činjenice da je vijek trajanja nije ovisan o broju ciklusa ili razini pražnjenja, već o broju sati koliko je sustav u funkciji. Tijekom normalnog rada, cink-brom baterije ne predstavljaju opasnost za okoliš. One međutim, sadrže materijale koji mogu zagađiti okoliša. Brom je toksičan materijal i treba biti prikupljen u slučaju izlivanja ili na kraju životnog vijeka baterije. Cink-brom je korozivan i treba postupati s njim na odgovarajući način.[2]

- **Cink zrak baterija**

Kao što joj ime govori, stvaranje električne energije u ovoj bateriji se zasniva na reakciji cinka i zraka, tj. kisika. Kako bi kisik imao pristup do cinčanih elektroda u unutrašnjosti baterije, kućište baterije probušeno je malim otvorima. Kada se pakiranje otvori, kisik u dodiru s cinčanim elektrodama proizvodi električnu energiju i baterija se postupno prazni, bez obzira koristili je ili ne. Ova baterija se može koristiti preko dva tjedna, međutim samo jednom. Kada prestane davati napon, bateriji preostaje samo recikliranje. „Znanstvenici sa Sveučilišta Stanford razvili su naprednu cink-zrak bateriju s višom katalitičkom aktivnosti i trajnosti od sličnih baterija izrađenih sa skupom platinom i iridijem kao katalizatorom. Rezultati, objavljeni u online izdanju časopisa *Nature Communications*, mogli bi dovesti do razvoja jeftine alternative konvencionalnih litij-ionskih baterija koje se danas naširoko koriste. „Sve su veći zahtjevi za visokim performansama, jeftinim i sigurnim baterijama za prijenosnu elektroniku, električna vozila i ostale uređaje za pohranu energije“, rekao je Hongjie Dai, profesor kemije sa Sveučilišta Stanford i glavni autor studije. „Metal-zrak baterije nude moguće jeftino rješenje.“[7] „Da je najviše pažnje usmjereno na litij-ionske baterije, unatoč ograničenoj energetske gustoći

(pohranjena energija po jedinici volumena), visokoj cijeni i sigurnosnim problemima. „Uz dovoljno opskrbe kisikom iz atmosfere, metal-zrak baterije su drastično povećale teorijsku gustoću energije od tradicionalne „vodene baterije“ ili litij-ionske baterije“ rekao je. „Među njima, cink-zrak baterija je tehnički i ekonomski najviše održiva opcija.“ Cink-zrak baterije kombiniraju atmosferski kisik i metal cink u tekućem alkalnom elektrolitu za proizvodnju električne energije s nusproduktom cink oksidom. U obrnutom procesu za vrijeme punjenja, kisik i cink se regeneriraju.[7], Cink-zrak baterije su atraktivne zbog lake dostupnosti i niske cijene cinka, kao i negorive prirode vodenih elektrolita, koji čine baterije sigurnima za rad. „Primarne (nepunjive) cink-zrak baterije su komercijalizirane za medicinsko i telekomunikacijsko korištenje s ograničenom gustoćom snage. Međutim, ostaje veliki izazov razviti punjive baterije, kad je kamen spoticanja nedostatak učinkovitih i robusnih katalizatora zraka, kao i ograničen vijek trajanja elektroda cinka.“ Aktivni i izdržljivi elektrokatalizatori na zračnoj elektrodi su potrebni kako bi katalizirali reakciju redukcije kisika tijekom pražnjenja i reakciju razvoja kisika tijekom punjenja. U cink-zrak baterijama, obje katalitičke reakcije su spore. Nedavno je njegov znanstveni tim razvio niz visokoučinkovitih elektrokatalizatora načinjenih s oksidima neplemenitih metala ili nanokristalima hibridiziranih s ugljikovim nanocjevčicama. Ovi katalizatori proizvode veću katalitičku aktivnost i izdržljivost u lužnatim elektrolitima od katalizatora napravljenih s platinom i drugim plemenitim metalima. „Otkrili smo da su slični katalizatori uvelike potaknuli izvedbu cink-zrak baterija“. I primarnih i punjivih. „Kombinacija kobalt-oksida hibrida zračnog katalizatora za smanjenje kisika i nikal-željezo hidroksid hibrida zračnog katalizatora za evoluciju kisika je rezultirala rekordno visokom energetsom učinkovitošću za cink-zrak baterije, s visokom energetsom gustoćom više nego dvostrukom od litij-ionske tehnologije. “Nova baterija je također pokazala dobru reverzibilnost i stabilnost tijekom dugog ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom nekoliko tjedana. „Ovaj rad mogao bi biti važan korak prema razvijanju praktične punjive baterije cink-zrak, iako druge izazove koji se odnose na cink elektrode i elektrolite tek treba riješiti“.[8]

### **3.5. Superkondenzatori**

„Kondenzatori se sastoje od dvije metalne elektrode, najčešće od silicija, i izolacijskog materijala (dielektrika) smještenog između njih, čija je svrha akumuliranje električnog naboja. Osnovna jednadžba kondenzatora je:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (1)$$

gdje  $C$  označava elektrostatički kapacitet (izražen u F ili češće  $\mu\text{F}$ ),  $\varepsilon$  dielektričnu konstantu dielektrika,  $S$  površinu elektrode, a  $d$  debljinu dielektričnog sloja. Princip akumulacije naboja je slijedeći: ako kondenzator spojimo na neki izvor napajanja (bateriju), počne teći struja tako da elektrone privlači pozitivni pol baterije pa se oni kreću prema izvoru. Energija pohranjena u konvencionalnom kondenzatoru ovisi o njegovom kapacitetu i razlici napona na elektrodama. To pokazuje slijedeća jednačba:

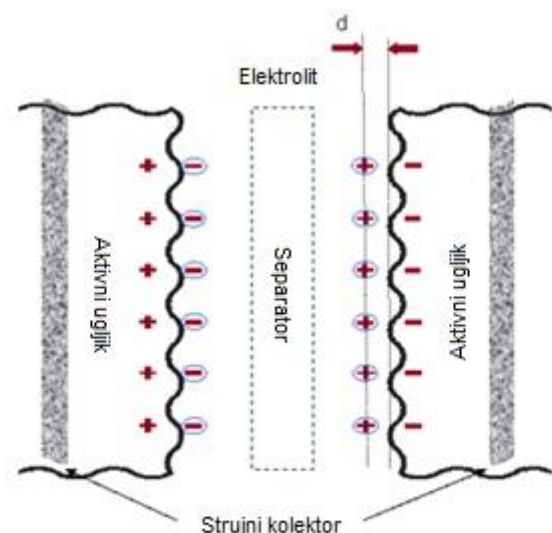
$$E = \frac{1}{2} C U^2, \quad (2)$$

dok maksimalna snaga ovisi o ekvivalentnom serijskom otporu:

$$P_{MAX} = \frac{U^2}{4ESR}. \quad (3)$$

Iz ove jednačbe vidljivo je kako ekvivalentni serijski otpor ograničava maksimalnu snagu kondenzatora.

Razvojem tehnologije omogućena je izvedba kondenzatora značajno velikih površina elektroda i manjeg razmaka među njima. Naime, jednom gramu aktiviranog ugljika (od kojeg su najčešće izrađene elektrode) odgovara površina od  $2000 \text{ m}^2$ , a razmak između elektroda je nanometarskog iznosa. Prema tome, ako pogledamo izraze (1) i (2), vidimo da je time povećan kapacitet, kao i količina energije koju je moguće pohraniti u takav kondenzator, u odnosu na konvencionalni kondenzator pri istom naponu. Uz sve to, danas je tehnološki moguće i održati male iznose ekvivalentnog serijskog otpora pa gustoća snage ostaje velika, prema izrazu (3). Na slici 3.10 prikazan je poprečni presjek jednog superkondenzatora.



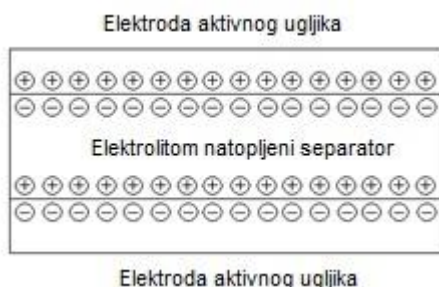
**Slika 3.10 Superkondenzator**

Kao što je već bilo navedeno, većina superkondenzatora je načinjena od dvije elektrode od aktivnog ugljika, elektrolita (vodenog ili organskog) i separatora, koji služi kao električna izolacija između elektroda, ali propušta prijenos iona. Kada se superkondenzator spoji na neki napon, ioni u elektrolitu difundiraju kroz separator i ulaze u pore elektrode suprotnog naboja. Naboj se tako akumulira na granici elektrolita i elektrode te dolazi do fenomena stvaranja električnog dvosloja između vodljive krute i tekuće površine. To su dva sloja naboja odvojena nekoliko ångströma, što je jednako udaljenosti od površine elektrode do sredine ionskog sloja. Kapacitet dvosloja je posljedica te podjele naboja, a kako je inače kapacitet proporcionalan površini a recipročan udaljenosti dvaju slojeva, postižu se visoke vrijednosti kapaciteta. Iz svega navedenog vidljivo je koja je svojstva bitno zadovoljiti kod superkondenzatora:

- velika ionska vodljivost elektrolita i separatora
- velika elektronska otpornost separatora
- velika elektronska vodljivost elektroda
- velika površina elektroda
- mala debljina separatora i elektroda

Superkondenzatori pohranjuju naboj elektrostatskim putem, te gotovo da nema nikakve reakcije između elektroda i elektrolita. Prema tome, njihov vijek trajanja je prilično dug jer mogu podnijeti stotine tisuća ciklusa punjenja i pražnjenja. Kao što je već bilo rečeno, upravo su elektrode ono što čini ogromnu razliku između superkondenzatora i ostalih vrsta kondenzatora, i to zbog toga što se tehnologija koja stoji iza superkondenzatora bazira na ugljikovim

nanocjevčicama. Ta tehnologija omogućuje vrlo veliku površinu elektroda i iznimno malu udaljenost između njih. Što se tiče, pak, dielektrika, njegova uloga nije samo da razdvaja elektrode već i sam ima određena električna svojstva koja utječu na ukupne performanse superkondenzatora. Materijali koji se u običnim kondenzatorima tipično koriste kao dielektrik (keramika, polimerne folije, aluminijski oksid) nisu toliko zastupljeni u superkondenzatorima, već se umjesto njih koristi fizička pregrada načinjena od aktivnog ugljika, i zbog toga se, uz narinuti napon, stvara već spomenuto dvostruko električno polje koje se ponaša kao dielektrik. Površina sloja aktivnog ugljika iznimno je velika (nekoliko tisuća kvadratnih metara po gramu!), što omogućuje apsorpciju velike količine iona. Proces punjenja i pražnjenja superkondenzatora odvija se na iono-apsorpcijskom sloju formiranom na elektrodama. Na kontaktu elektroda s elektrolitom formiraju se slojevi pozitivnog i negativnog naboja kao na slici 3.11.



**Slika 3.11 Električni dvosloj**

Tako formirani električni dvosloj funkcionira kao izolator sve dok se na superkondenzator ne spoji dovoljno velik napon te struja počne teći. Maksimalni napon je onaj pri kojem elektrolit više ne može zadržati naboje na elektrodama odvojenim i dolazi do proboja. Elektrolit može biti čvrsti, tekući, ili organskog karaktera. Organske elektrolite dobivamo otapanjem kvartarnih soli u organskim otapalima, a najpoznatiji su propilen karbonat i acetonitril. Najčešći tekući elektroliti su kalijev hidroksid i sumporna kiselina. Organski elektroliti u pravilu imaju veći disocijacijski napon od tekućih, a gustoća energije ovisi o kvadratu napona, pa superkondenzatori s organskim elektrolitom imaju oko četiri puta veću gustoću energije nego oni s tekućim elektrolitom. No ponekad primjena zahtjeva veliku gustoću snage izvora, i tada organski superkondenzatori nisu dobar izbor, jer se javlja unutarnji otpor zbog niže vodljivosti elektrolita. To znači da, ukoliko želimo da superkondenzator radi na višim naponima, elektrolit mora imati visoku vodljivost te biti elektrokemijski stabilan. Što se, pak, tiče separatora, njihova je uloga omogućiti gibanje iona te istovremeno spriječiti elektronski kontakt između elektroda, pa je važno pravilno odabrati separator za što bolje performanse superkondenzatora. Kod superkondenzatora s organskim elektrolitom koriste se polimerni ili papirni separatori, a ukoliko

superkondenzator ima tekući elektrolit najčešće se upotrebljavaju keramički separatori ili separatori sa staklenim vlaknima.“[14]

## **4. PROJEKT PRIKLJUČENJA NA MREŽU**

### **4.1. Karakteristike elektroenergetskih sustava za pohranu podataka**

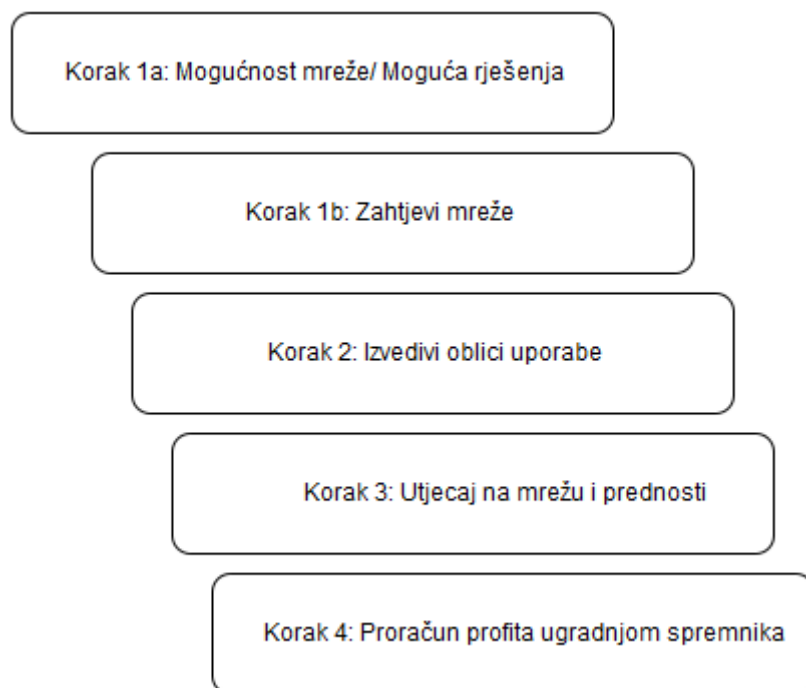
Osnovna razlika u operativnim karakteristikama tradicionalnih elektrana i sustava za pohranu električne energije u mreži je ta da kod tradicionalne proizvodnje energija uvijek teče u jednom smjeru, a sustavi za pohranu električne energije zahtijevaju dvosmjerni protok energije, kako za punjenje tako i za pražnjenje. Ostale karakteristike spremnika električne energije nadovezuju se na osnovnu razliku. Prvo, energija za punjenje može doći iz jednog izvora ili raznih izvora na temelju proizvodnog portfelja mreže kao cjeline to svojstvo se mijenja tijekom vremena. Drugo, manji spremnici mogu biti smješteni bilo gdje unutar mreže. Dok se veliki spremnici moraju nalaziti na prijenosnoj mreži, manji sustavi mogu biti ugrađeni u distribucijskoj mreži, stvarajući mogućnosti smanjenja opterećenja u mreži. Treće, svojstveno brzo vrijeme odziva pojedinog ciklusa je i prednost i slabost u procjeni njegove vrijednosti. Ova karakteristika stvara prilično složene računalne zadatke za alate i računalne modele koji su potrebni za analizu financijske i tehničke izvedbe za priključenje spremnika električne energije na mrežu. Konačno, jedan sustav za pohranu električne energije može pružiti više usluga za mrežu. [2]

### **4.2. Procjena sustava za pohranu električne energije**

S obzirom na ove karakteristike, općeniti pristup za procjenu spremnika električne energije sastoji se od:

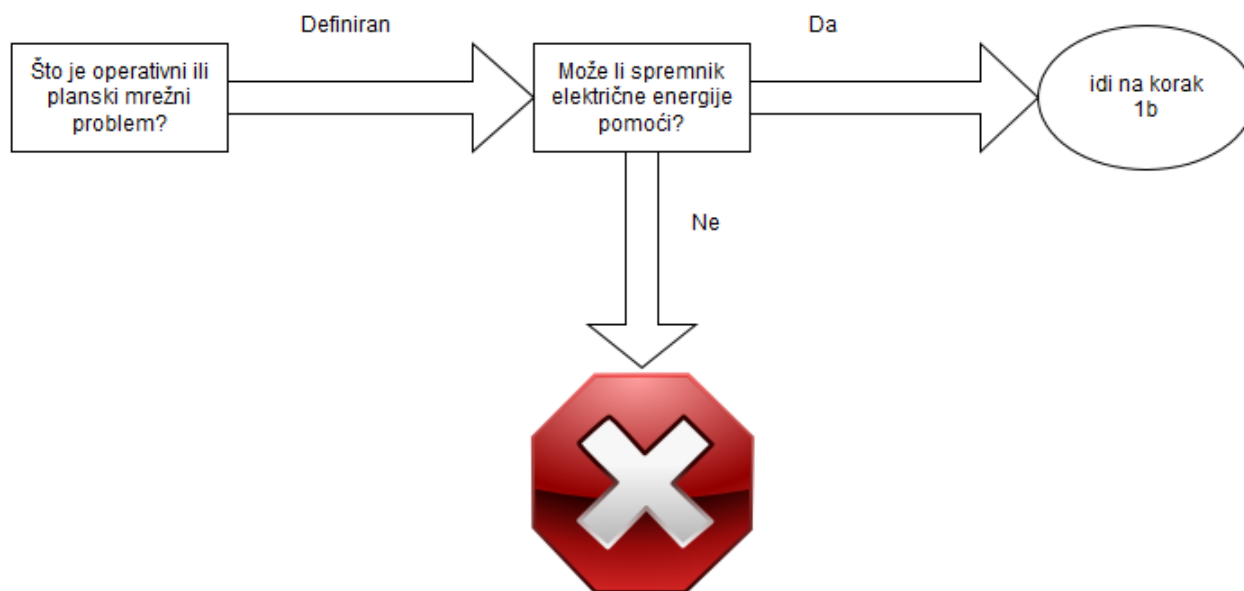
- Procjenjivanja veličine za pohranu koja proizlazi iz potrebe za električnim spremnikom na mjestu postavljanja koju zahtijevaju mrežni operator i planeri;
- Izbjegavanja spajanja neodgovarajućih usluga;
- Odgađanja intenzivnog ulaganja u proširenje mreže sve dok je to tehnički izvedivo, i
- Odgađanja istraživanja regulatornih scenarija sve dok je isplativo, nakon tehničkog proračuna troškova.

Sljedeća metoda osigurava okvir za procjenu veličine spremnika električne energije s koracima opisanim u nastavku. Slika 4.1 pruža vizualni prikaz okvira za procjenu.[2]



**Slika 4.1 Koraci za procjenu veličine spremnika električne energije**

- Korak 1a mogućnosti mreže/moguća rješenja**



**Slika 4.2 Dijagram tijeka koraka 1a**

Što je Operativni ili planski mrežni problem?

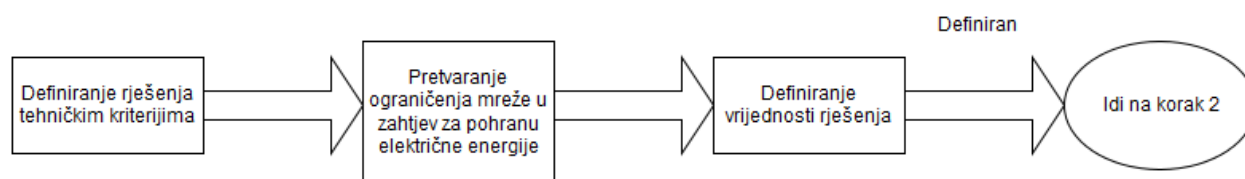
Mrežni operativni ili planski problemi može biti zagušeni dalekovod, veliko vršno opterećenje, prekid rada, odstupanje napona uzrokovano povećanom upotrebom obnovljivih izvora, itd. Neke

od usluga koje pomažu ublažiti te probleme formalno su kategorizirani u pomoćne usluge i mogu se nabaviti putem tržišta. Drugi su specifični problemi koji zahtijevaju jedinstveno rješenje.

Može li spremnik električne energije pomoći?

Spremnik električne energije može pohraniti i kasnije vratiti energiju, učinkovito „premještajući“ energiju iz jednog do drugog razdoblja (s gubicima). Kad se može ostvariti tehnička i ekonomska dobit vremenskim razdvajanjem energije u određenim vremenskim razdobljima u bilo kojem rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko dana (ili čak sezonu), tada postoji isplativost spremnika. Osim toga, energetska elektronika u baterijskim spremnicima uglavnom brzo odgovara, i može raditi pri nejednakom faktoru snage, zbog toga se može koristiti za promjenu izmjeničnog napona. Ove karakteristike mogu pružiti dodatne mogućnosti za pružanje pomoćnih usluga, kao što su regulacija frekvencije i održavanje napona. Prvi korak u istraživanju je postavljanje pitanja: "Koji je mrežni operativni ili planski problem?", te da li glavna usluga spremnika može pružiti zadovoljavajuće rješenje ako je odgovor "da", drugi dio prvog koraka je definirati problem i rješenje s dodatnim tehničkim značajkama u koraku 1b.[2]

- **Korak 1b zahtjevi mreže**



**Slika 4.3 Dijagram tijeka koraka 1b**

Definiranje rješenja tehničkim kriterijima

Nakon utvrđivanja prednosti ili rješenja da spremnik za pohranu električne energije može pružiti dobit, sljedeći analitički korak je definiranje tehničkih ograničenja mreže i proračun tehničkih uvjeta za rješavanje ograničenja. Ovaj korak uzima u obzir mrežna ograničenja i prednosti, umjesto primjene određenog resursa. Pretvaranje ograničenja mreže u zahtjev za pohranu električne energije. Komuniciranje s ključnim sudionicima i donositeljima odluka je ključno za određivanje odgovarajućih karakteristika, minimalnih kriterija za rad i najboljih dostupnih alternativna (koja ne uključuju pohranu električne energije) za rješavanje problema. Tehnički kriteriji za izbor spremnika za pohranu električne energije određuju se na temelju informacija dostupnih za određeno mjesto, uključujući oblik krivulje opterećenja, pravila sudjelovanja na

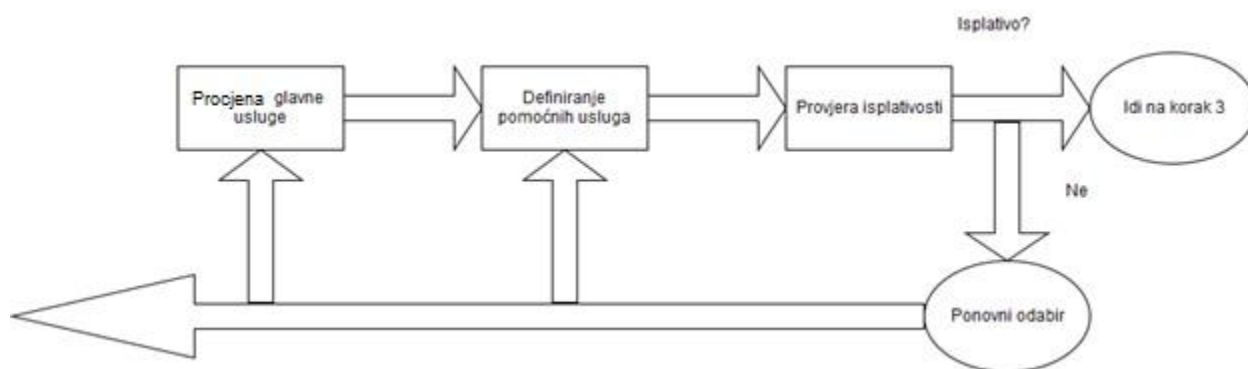


tržištu, troškova proizvodnje i drugih vremenski promjenjivih i statičkih svojstava relevantnih za mrežu.

### Definiranje vrijednosti rješenja

Vrijednost rješenja za pohranu električne energije može se izračunati na temelju smanjenja troškova ili izračunatog očekivanog prihoda odabrane usluge koju spremnik pruža mreži. To može zahtijevati korištenje inženjerskih alata za prepoznavanje učinkovitosti za spremnik za pohranu električne energije ili za alternativno rješenje za zadani problem. Međutim, metoda ovisi o usluzi koja je potrebna mreži. Također se može uzeti u obzir i dokumentirati da li pohrana električne energije ili alternativno rješenje premašuje minimalne uvjete usluge, koji mogu opravdati prilagodbu u vrijednosti troškova odabrane opcije za pohranu električne energije.[2]

- **Korak 2 izvedivi oblici uporabe**



**Slika 4.4 Dijagram tijeka koraka 2**

### Procjena glavne usluge

Spremnici električne energije često sadrže uslugu nerazmjerno velike vrijednosti, koja se zove glavna usluga. Nakon zahtjeva utvrđenih za glavnu uslugu u koraku 1b, tehnologija pohrane električne energije i mogućnost konfiguracije mogu se ispitati. Relativna vrijednost glavne usluge zatim može biti ispitana za različite opcije pohrane električne energije. U nekim slučajevima, glavna usluga može imati određenu lokacijsku vrijednost. Na primjer, vrijednost pružanja odgode nadogradnje distribucijske mreže ovisi o veličini investicije, stopi rasta opterećenja i učestalosti i trajanju vršnog opterećenja, a svi su jedinstveni za svaku lokaciju. Nasuprot tome, usluga regulacije frekvencije može biti osigurana iz mnogih mjesta u području. Korištenje spremnika za pohranu električne energije i vrijednost glavne usluge može se procijeniti s određenim operativnim pretpostavkama ili simulirati pomoću simulacije. Tipično,

ako dobit sustava od mrežne usluge iznosi 25% do 50% iznosa ukupne cijene sustava za pohranu električne energije tada se određenu mrežnu uslugu može definirati kao glavnu uslugu

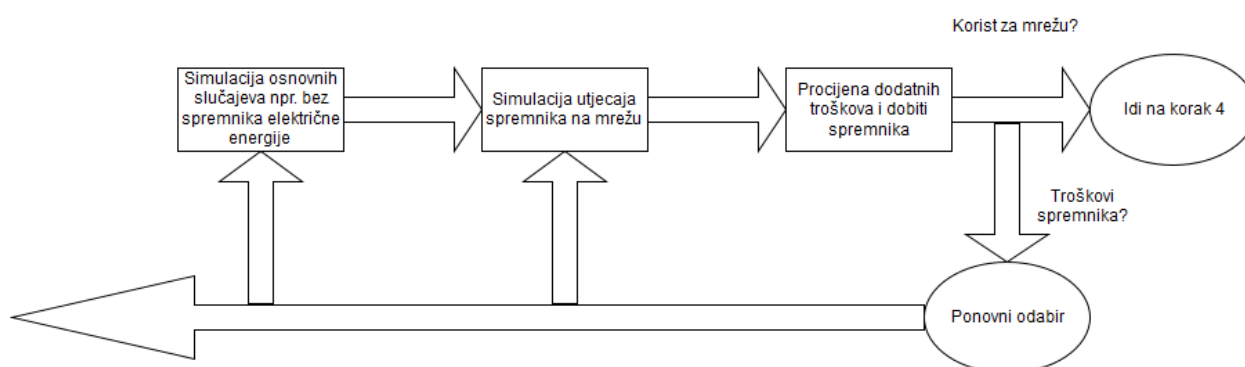
#### Definiranje pomoćnih usluga

Nakon što je glavna usluga ocijenjena i odabrana za daljnje ispitivanje, mogu se uzeti u obzir i druge kompatibilne mrežne usluge, koje se nazivaju pomoćne usluge. Pomoćne usluge mogu zahtijevati dulje trajanje dostupnog prostora za pohranu ili brži odgovor, ili neki drugi operativni parametar koji nije potreban za glavnu uslugu. Ako minimalni zahtjevi za pomoćne usluge značajno povećavaju inkrementalni trošak, onda se cijena pomoćnih usluga za pohranu električne energije treba ponovno razmotriti u odnosu na očekivanu inkrementalnu vrijednost.

#### Isplativost

Nakon odabira načina uporabe, uključujući glavnu uslugu, kompatibilne pomoćne usluge, te tehnologije spremnika električne energije, analiza može biti izvršena da kvantificira prednosti kombinacije mrežnih usluga, lokacije i tehnologije. U nekim slučajevima, vrlo jednostavna analiza može biti dovoljna da bi se izdvojili oni slučajevi čiji su troškovi izgradnje znatno veći od dobiti. Međutim, s obzirom na složenost modeliranja ograničenih energetske resursa i važnosti vremenski promjenjivih opterećenja i vrijednosti, postoji potreba za složenijom analizom.[2]

- **Korak 3 utjecaj na mrežu i prednosti**



**Slika 4.5 Dijagram tijeka koraka 3**

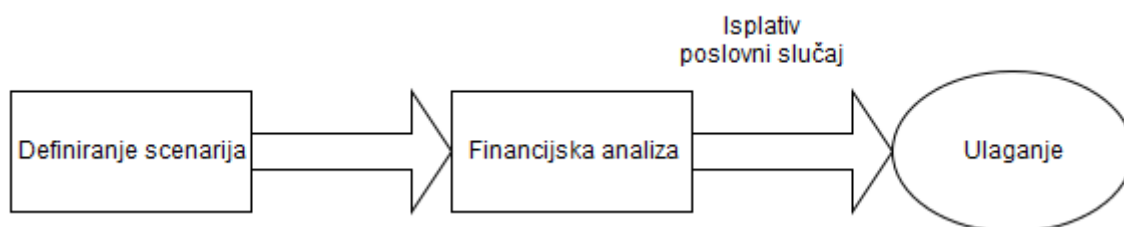
Korak 2 omogućuje analitičarima procjenu jedne ili više tehničkih prednosti učinkovitog korištenja kako bi se poboljšalo razumijevanje izravnih troškova i koristi ulaganja u spremnike električne energije. Koraci 1 i 2 uključuju konceptualno razumijevanje o tome kako spremnik za

pohranu može utjecati na elektroenergetski sustav. Analitičar tada može oblikovati hipotezu kako bi testirao uporabu spremnika za pohranu pomoću simulacije, koja ima regionalnu perspektivu potrebnu za procjenu utjecaja na sustav.

#### Procjena dodatnih troškova i dobiti spremnika

Namjera 3. koraka je istražiti utjecaj i dodatnu koristili troškove za elektroenergetski sustav ugradnjom spremnika za pohranu električne energije. Dodatna korist može biti planirana, ali nije izravna korist zbog čega se spremnik ugrađuje. Na primjer, spremnik za pohranu električne energije može smanjiti emisiju stakleničkih plinova pružajući svoju pohranjenu energiju sustavu tijekom razdoblja vršnog opterećenja i smanjujući potražnju za uporabom plinske elektrane tijekom tog perioda. Međutim, ako spremnik nije na mreži da bi smanjio emisiju stakleničkih plinova, onda je to dodatna korist. Rad spremnika električne energije može povećati rad generatora koji proizvode stakleničke plinove, što zapravo može povećati emisiju stakleničkih plinova, no razumijevanje složenih odnosa sustava zahtijeva simulaciju proizvodnje. Ukratko, dodatne koristi mogu biti posljedica pravilnim upravljanjem sustavom za pohranu električne energije i drugim karakteristikama električnog sustava.[2]

- **Korak 4 proračun profita ugradnjom spremnika**



**Slika 4.6 Dijagram tijeka koraka 4**

Predzadnja faza procjene isplativosti spremnika za pohranu električne energije je istražiti stvarne poslovne slučajeve. Razlika između ove faze analize i svih prethodnih koraka je uključivanje relevantnih politika i regulacijskih scenarija, kao i naprednija poslovna i financijska analiza. Korak 4 se razlikuje od koraka 2 i 3 po tome što je usredotočen na zaradu za vlasnika spremnika električne energije, a ne na ukupnu korist svih zainteresiranih strana. Definiranje scenarija

Razmotrimo primjer slučaja uporabe koji uključuje odgodu nadogradnje prijenosne mreže, vremensko razdvajanje, te uslugu regulacije frekvencije. U koracima 2 i 3, ocjenjuje se tehnička sposobnost sustava za pohranu električne energije, a potencijalna vrijednost usluga za pohranu

električne energije se izračunava (kvantitativno). Ovisno o ciljevima analize za vrednovanje pohrane, praktično je izvesti korak 4 Paralelno s 2. korakom kako bi provjerili ukupnu dobit kao i dobit za vlasnika pohrane. Tijekom dužeg vremenskog razdoblja, politika i regulacija su promjenjive, tako da analitičar smatra da se ti problemi odvojeno računaju kako bi se pripomoglo istraživanje za procjenu veličine spremnika.[2]

## 5. SNIMANJE NAPONA I STRUJE PUNJENJA I PRAŽNJENJA BATERIJA

Korištena oprema: baterija CSBGP 1272 F2, regulator punjenja StecaSolsum 10.10F, watmetar, fotonaponski modul BISOL BMO-250, izmjenjivač HPLS 600, led žarulja 5W.

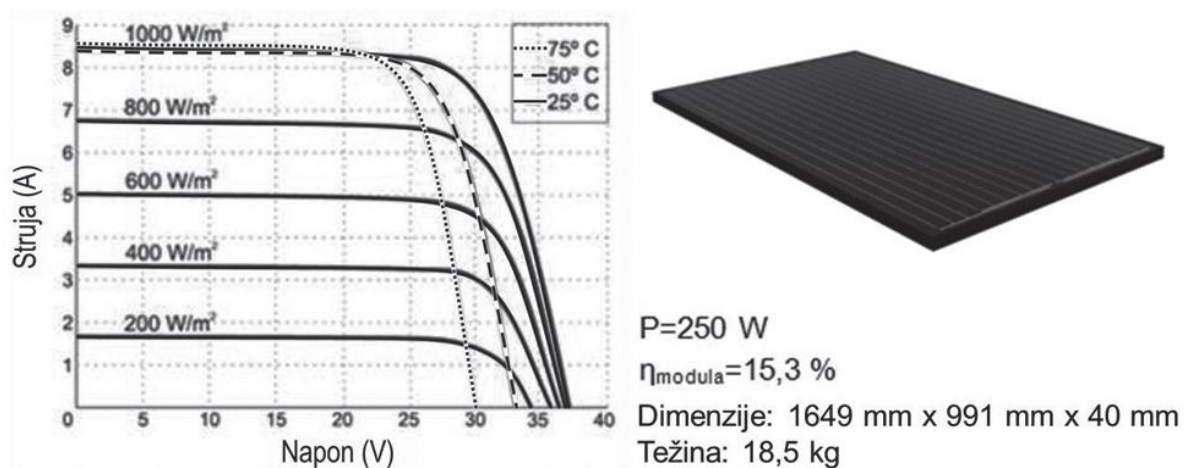
Nazivni podaci:

- Fotonaponski modul BISOLBMO-25

Struje i naponi praznog hoda i maksimalne vrijednosti za temperaturu od 25 °C i za različite razine sunčevog zračenja.

$t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zračenje	$I_0(\text{A})$	$U_0(\text{V})$	$I_{\text{max}}(\text{A})$	$U_{\text{max}}(\text{V})$
1000 W/m <sup>2</sup>	8,80	38,4	8,25	30,3
800 W/m <sup>2</sup>	6,78	36,8	6,04	30,0
600 W/m <sup>2</sup>	5,0	36,3	4,46	30,5
400 W/m <sup>2</sup>	3,4	35,7	2,98	30,3
200 W/m <sup>2</sup>	1,66	34,2	1,1	30,34



**Slika 5.1 strujno naponska karakteristika fotonaponskog modula[9]**

- Baterija CSB GP1272 F2

Napon: 12 V

Kapacitet: 7.2 Ah

Dozvoljena početna struja punjenja: 2,15 A

Maksimalna struja pražnjenja: 100 A[10]

- Kontroler punjenje STECAsolsum 10.10F

Napon izlaza: 12 ili 24 V

Napon na ulazu u kontroler: <47 V

Napon pri završetku punjenja: 13.9 V (27.8V) [11]

- IzmjenivačPurSinusCLS 600-24

Maksimalna ulazna struja: 30 A

Ulazni napon: 24 V DC (22-28V)

Izlazni napon: 230 V AC

Nazivna izlazna snaga: 600 W

Vršna izlazna snaga: 1200 W[12]

## VRLA baterije

### Zatvorene olovne akumulatorske baterije (VRLA)

„VRLA (Valve Regulated Lead-Acid) baterije su potpuno zatvorene, s izuzetkom ventila koji služi za oslobađanje plinova u havarijskim uvjetima punjenja. Kod ove vrste akumulatorskih baterija, za razliku od otvorenih ili klasičnih olovnih akumulatorskih baterija, provodi se rekombinacija plinova tijekom punjenja. Pri kraju procesa punjenja dolazi do elektrolize vode. Na pozitivnoj ploči se tada stvara kisik, a na negativnoj ploči vodik. Kod klasičnih olovnih baterija zbog elektrolize dolazi do gubitka vode. Prvo se počne na pozitivnoj ploči oslobađati kisik. Vodik se pak na negativnoj ploči počinje oslobađati tek kad je proces punjenja praktički završen. Onaj dio kisika koji dopiše do negativne ploče ne odlazi u zrak već na njoj reagira s olovom i stvara olovni oksid. Olovni oksid zatim reagira sa sumpornom kiselinom i nastaje olovni sulfat. Rezultat ovih reakcija je samopražnjenje negativne ploče. To samopražnjenje se kod određene razine napunjenosti ujednači s istovremenim punjenjem. Navedeni proces se događa i kod klasičnih baterija, ali kod njih samo mali dio stvorenog kisika dopiše do negativne ploče pa se kisik uglavnom ispušta u okolinu, a na kraju punjenja negativna ploča se dovoljno napuni pa se na njoj počne u okolni zrak ispuštati eksplozivni vodik. Za razliku od klasičnih baterija, VRLA baterije su tako konstrukcijski riješene da praktički sav kisik koji se oslobodi na pozitivnoj ploči dopiše do negativne ploče gdje se tada odvija opisani proces rekombinacije. Rezultat tog procesa je taj da se negativna ploča nikako ne uspijeva napuniti do razine pri kojoj započinje proces oslobađanja vodika. Dok se kod otvorenih ili klasičnih olovnih baterija gubitak vode treba redovito nadomješćati, kod VRLA-ih baterija to nije potrebno (ni moguće). Zbog toga se za VRLA baterije kaže da su "bez održavanja". Vrlo niska razina oslobađanja eksplozivnog vodika omogućuje pak postavljanje VRLA baterija uz ostalu opremu te njihovu ugradnju u razvodne ormare. Punjenje izvan točno propisanih naponskih okvira može ipak uzrokovati pojavu manje količine eksplozivnog vodika koji se oslobađa kroz ispušni ventil. U slučaju da se takvi uvjeti punjenja zadrže duže vrijeme, doći će do preranog gubitka kapaciteta akumulatorske baterije. VRLA baterije su osjetljivije i na povišene temperature okoline, što ima za posljedicu trajno gubljenje kapaciteta, ovisno o temperaturi i njezinom trajanju. Zatvorene olovne akumulatorske baterije su podložne svim kvarovima koji su mogući i kod klasičnih olovnih baterija, ali kod njih može doći i do havarije uslijed "termičkog pobjega", kvara koji nije svojstven klasičnim olovnim baterijama. "Termički pobjeg" nastaje uslijed rekombinacije kisika kroz imobilizirajući elektrolit (separator). U nenormalnim radnim uvjetima, posebno pri visokim

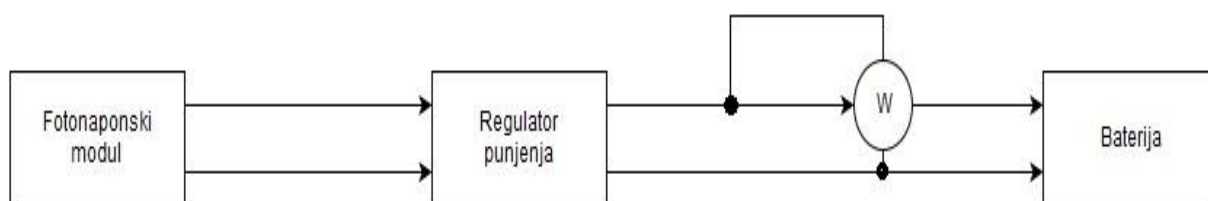
radnim temperaturama ili previsokom naponu punjenja, zatvorena baterija se može zagrijati brže nego što toplinu može predati okolini. U tom slučaju će temperatura baterije narasti toliko da će plastična posuda oslabiti, pući i rastopiti se. Štetan utjecaj povišenih temperatura okoline moguće je kod zatvorenih olovnih akumulatorskih baterija ublažiti temperaturnom regulacijom napona ispravljača. Budući da realno nije moguće osigurati da ne dođe do neželjenih režima rada u kojima baterija ispušta vodik i kod zatvorenih olovnih baterija je potrebno predvidjeti minimalno potrebno ventiliranje (najčešće je dovoljna prirodna ventilacija). Zbog istog razloga potrebno je bateriju udaljiti od uređaja koji se pretjerano griju ili iskre. Zatvorene olovne akumulatorske baterije proizvode se malih kapaciteta, od svega desetak Ah, ali i velikih kapaciteta od nekoliko tisuća Ah. Predvidivi životni vijek im je za normalne izvedbe 3-5 godina, ali postoje "longlife" baterije čiji je predvidivi životni vijek i do 20 godina.

S obzirom na tehnologiju izrade postoje dva tipa zatvorenih olovnih akumulatorskih baterija:

- Zatvorene olovne akumulatorske baterije s apsorbiranim elektrolitom
- Zatvorene olovne akumulatorske baterije s gel Elektrolitom „[13]

#### Snimanje karakteristike punjenja baterija

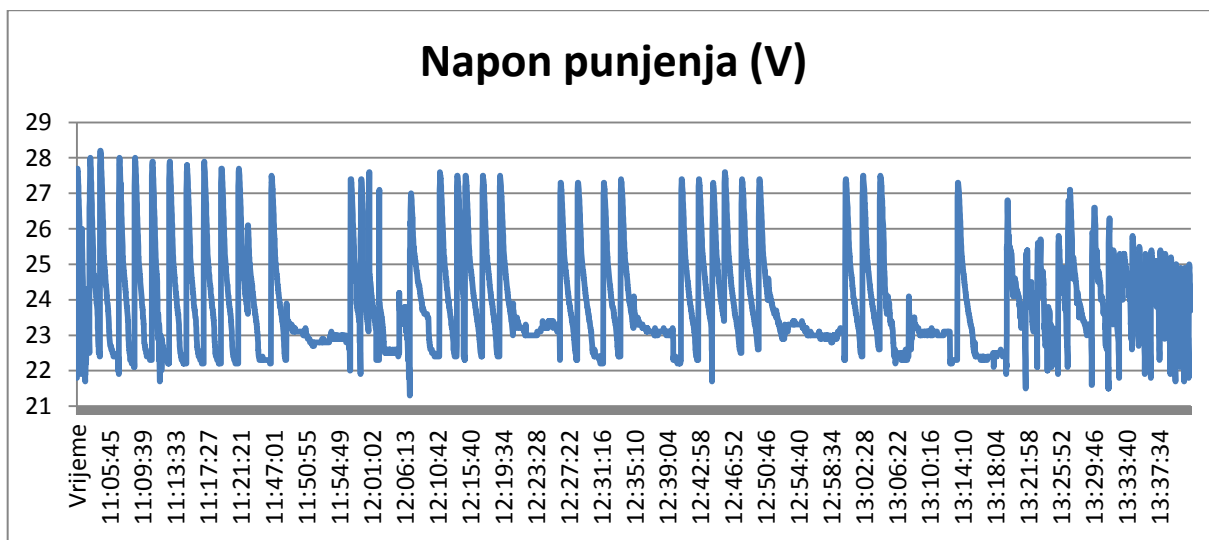
Kao izvor za punjenje baterije se koristi fotonaponski panel Bisol BMO-250 koji je spojen preko regulatora punjenja STECAsolsum 10.10F na dvije serijski spojene baterije CSB GP1272 F2. Shema za snimanje strujne i naponske karakteristike punjenja baterija je prikazana na sljedećoj slici.



**Slika 5.2 Prikaz spajanja pri punjenju baterija**

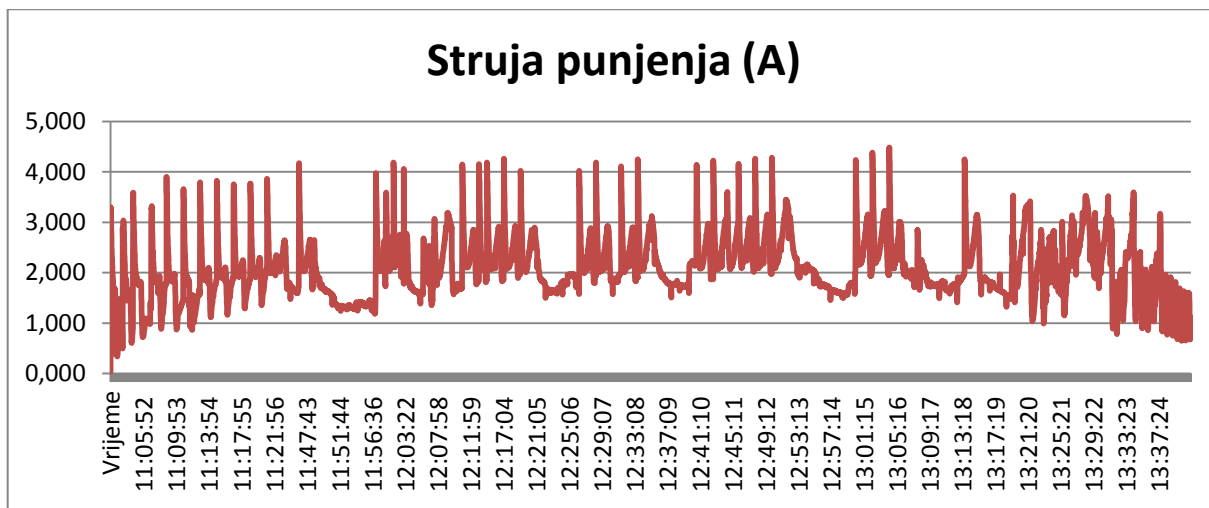
Napon baterije se tijekom punjenja mijenja tako da se proces odvija optimalno za bateriju, što ne mora biti optimalno za sustav, a najčešće nije. U pravilu, pri otočnom radu istosmjerna se trošila ne smiju priključiti izravno na bateriju već na priključnice regulatora koji osigurava stabilizirani istosmjerni napon od 12 V ili 24 V. Struja kojom se puni baterija jednaka je struji koja dolazi iz fotonaponskog modula. Napon na bateriji raste sve dok ne dosegne razinu definiranu

karakteristikom punjenja. Baterija se uvijek puni strujom koja nam je na raspolaganju u fotonaponskom modulu. Gledano na dijagramu snage, baterija se puni impulsima snage koji su produkt struje i napona baterije, odnosno struje iz fotonaponskog modula i trenutnog napona baterije. Kako se fotonaponski modul zapravo impulsno spaja na bateriju, ne iskorištava se sva energija koju fotonaponski modul proizvodi. [11]



**Slika 5.5 Napon punjenja baterija**

Na grafu je prikazan napon na bateriji tijekom vremena. Vidljivo je kako se napon mijenja u granicama od 21 do 28 V, te kako napon postupno raste u područjima gdje se baterija ne puni.



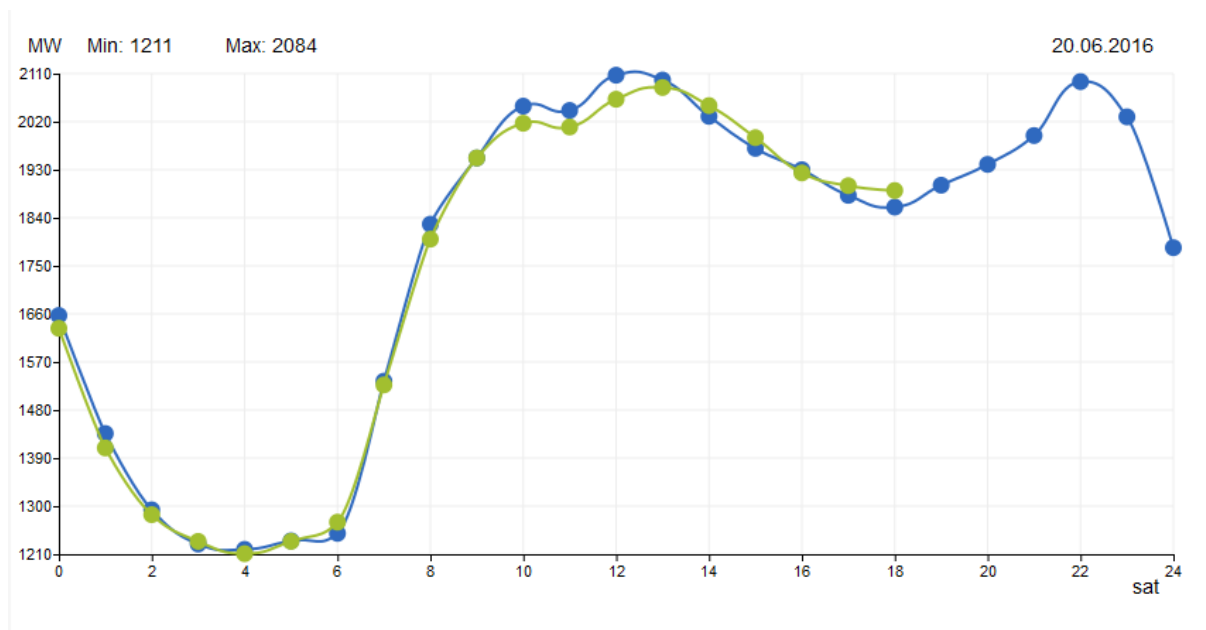
**Slika 5.4 Struja punjenja baterija**

Struja punjenja se također mijenja tijekom vremena u ovisnosti o struji koja je dostupna na izlazu fotonaponskog panela. Na grafu je vidljivo kako struja punjenja ovisi i o vremenu punjenja



baterije. Pri mjerenju je bilo vidljivo kako struja punjenja također ovisi o vremenskim prilikama, na primjer o nailasku oblaka. Te se tada struja znatno smanjila.

Vrijeme početka punjenja baterija je 11:06 što ne bi odgovaralo realnoj situaciji kada bi se baterija koristila kao spremnik električne energije za distribucijsku mrežu, jer je tad potrošnja električne energije velika što je vidljivo na sljedećoj slici dijagrama dnevnog opterećenja te bi ta energija bila potrebna sustavu. Ali to vrijeme može odgovarati realnoj situaciji kada se baterija koristi kao spremnik viška energije u otočnom radu fotonaponskog sustava, jer obično u to vrijeme je jačina sunčevog zračenja najjača. Ako i postoje potrošači električne energije vjerojatno će biti viška energije koju tada možemo pohraniti u baterije.

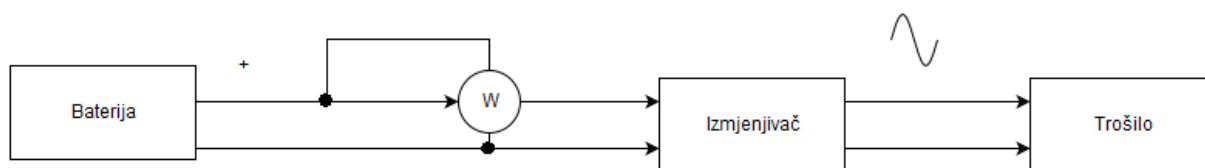


**Slika 5.5 Dnevni dijagram opterećenja**

Na slici je prikazan dijagram dnevnog opterećenja za dan 20.6.2016. vidljivo je kako je najveće opterećenje sustava bilo u 13:00 sati. A najpogodnije vrijeme za punjenje spremnika električne energije bilo bi između 2:00 i 6:00 jer je tada najmanja potrošnja električne energije, a bazne elektrane moraju raditi te su stoga potrebni potrošači. A i na tržištima električne energije je tada cijena najmanja, u nekim slučajevima zna biti i negativna, npr. kada u to vrijeme vjetroelektrane proizvode energiju.

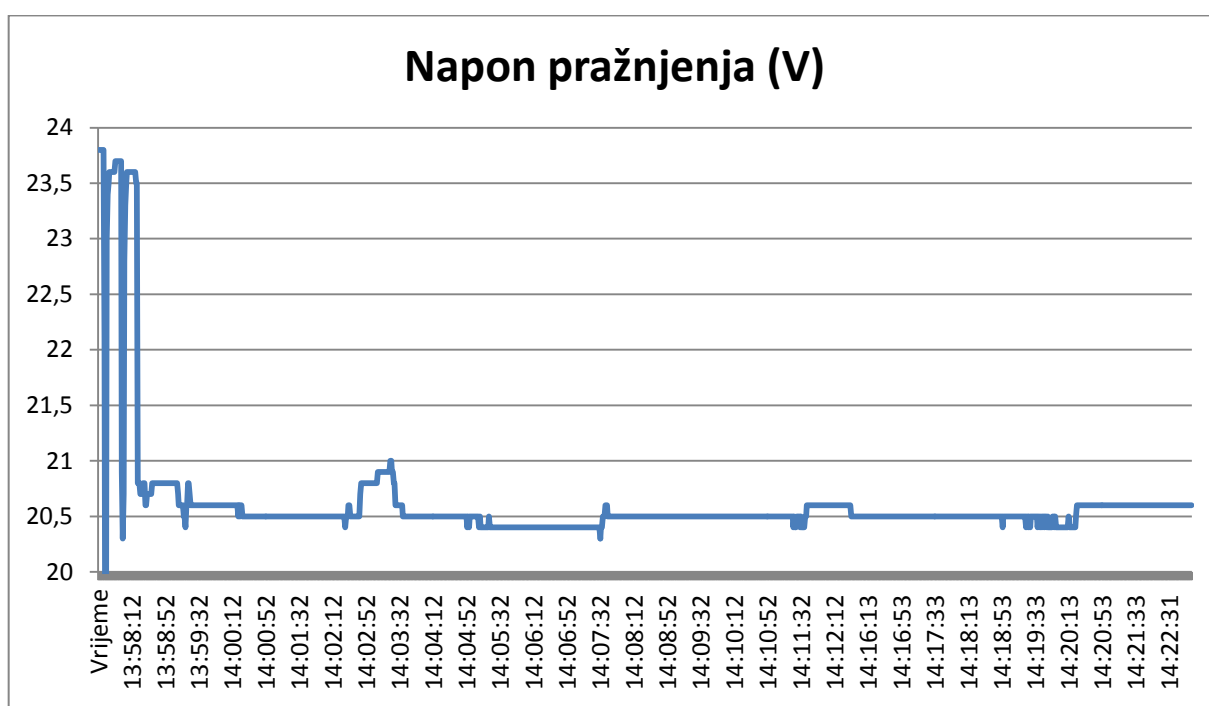
Snimanje karakteristike pražnjenja baterija

Kao potrošače energije koristimo tri LED žarulje snage 5 W nazivnog napona 230 V. Da bi proizveli izmjenični napon od 230 V koristimo izmjenjivač napona koji spajamo na baterije. Shema pražnjenja baterije je prikazana na slici.



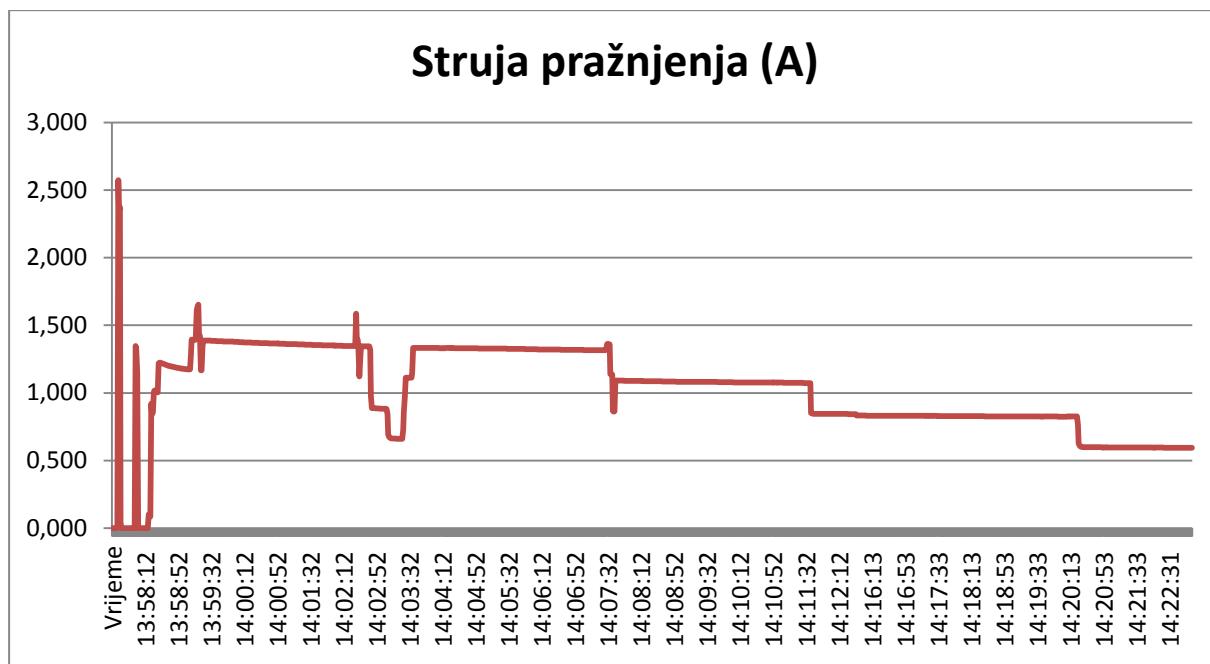
**Slika 5.6 Shema spajanja za pražnjenje baterija**

Izmjenjivač ima zaštitu kako ne bi došlo do dubinskog pražnjenja baterije, te daje zvučni signal kada se napon baterija spusti ispod 20,4 V. Baterije na početku opterećujemo s tri žarulje od 5 W, kasnije je opterećenje sniženo na dvije te na jednu žarulju što je vidljivo kod struje i napona pražnjenja. Na kraju jedino opterećenje baterija je potrošnja izmjenjivača.



**Slika 5.7 Napon pražnjenja baterija**

Vidimo kako se napon mijenja tijekom vremena. Što je duže baterija bila opterećena to se napon više smanjuje. Kada je došlo do isključivanja pojedinog opterećenja dolazi do povećanja napona baterije. U početku je napon blizu nazivne vrijednosti baterije, ali se brzo smanjuje jer je pri početku mjerenja bilo priključeno 8 žarulja od 5 W što je brzo ispraznilo baterije, te su ostale uključene samo tri žarulje.



**Slika 5.8 Struja pražnjenja baterija**

Struja pražnjenja je najveća u početku jer je tada najveće opterećenje. Svakim smanjenjem broja žarulja smanjuje se struja pražnjenja. Pri struji od 1,4 A izmjenjivač odnosno baterije su opterećene s tri žarulje. Struja od 1,2 A je opterećenje od dvije žarulje, a opterećenje jedne žarulje je struja od 0,8 A. Struja od 0,6 A je struja praznog hoda izmjenjivača.

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog sve većeg korištenja obnovljivih izvora kojima je teško prognozirati proizvodnju (vjetroelektrane i fotonaponske elektrane), javlja se potreba za korištenje spremnika za pohranu električne energije. Prognoze vjetra je teško predvidjeti i par sati unaprijed, a pošto se pojavljuje sve veći broj vjetroparkova, raste i potreba za pohranom električne energije posebno u noćnim satima kada nema potrošnje u sustavu odnosno kada je potrošnja neznatna. U posljednje vrijeme otvoreno tržište električnom energijom je u funkciji te je potreba za pohranom električne energije još veća, jer se električna energija može vrlo jeftino kupiti u satima niske potrošnje pogotovo ako je tada velika proizvodnja vjetroelektrana, a kasnije se može prodati po vrlo visokoj cijeni kada se pojavi potreba za električnom energijom. Ugradnjom na određenim lokacijama, spremnici električne energije mogu povećati stabilnost električne mreže i odgoditi nadogradnju postojeće distribucijske, pa čak i prijenosne mreže. Najčešći oblik spremnika električne energije zasad su reverzibilne hidroelektrane, no njihov problem je što je njihov smještaj u mreži određen

pogodnom lokacijom na kojoj se mogu izgraditi. Prednost im je što mogu pohraniti veće količine energije te se uglavnom koriste kao sezonski spremnici energije. Tehnologija s komprimiranim fluidom omogućuje također relativno velike količine pohranjene energije, ali također trebaju i puno prostora kako bi se pohranio komprimirani fluid te im lokacija izgradnje ovisi o pogodnoj lokaciji za pohranu fluida, a ne o lokaciji koja je pogodna za električnu mrežu. Dok se baterijski spremnici i superkondenzatori mogu zbog svoje veličine i kompaktnosti postaviti bilo gdje u mreži gdje je to potrebno, nedostatak im je mali kapacitet pohrane. Veličina i lokacija spremnika električne energije se određuje po potrebi električne energije na zadanoj lokaciji. A sam postupak određivanja optimalne veličine i lokacije spremnika električne energije opisan je u prethodnom poglavlju.

## LITERATURA

- [1] [http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE#Spremnici\\_topline](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE#Spremnici_topline)
- [2] DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA  
Abbas A. Akhil, Georgianne Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastler, Stella Bingqing Chen, Andrew L. Cotter, Dale T. Bradshaw, and William D. Gauntlett
- [3] [http://www.hk-phy.org/energy/alternate/print/hydro\\_phy\\_print\\_e.html](http://www.hk-phy.org/energy/alternate/print/hydro_phy_print_e.html)
- [4] <https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Skladi%C5%A1tenje+energije+komprimiranim+zrakom&oldid=4028321>
- [5] Energije, nove mogućnosti Ivica Aviani Institut za fiziku
- [6] [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/05\\_Zamasnjaci.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/05_Zamasnjaci.pdf)
- [7] <http://news.stanford.edu/>
- [8] <http://znanost.20minuta.hr/fosili-i-iskopine/9/nova-cink-zrak-baterija-visoke-ucinkovitosti/1024/>
- [9] [https://bib.irb.hr/datoteka/714432.photovoltaic\\_book.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/714432.photovoltaic_book.pdf)
- [10] <http://www.csb-battery.com/upfiles/dow01404181908.pdf>
- [11] [http://www.soselectronic.pl/a\\_info/resource/c/SOLSUM8.8F.pdf](http://www.soselectronic.pl/a_info/resource/c/SOLSUM8.8F.pdf)

[12] [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/514950-an-01-ml-WECHSELR\\_CLASSICPOWER\\_de\\_en\\_fr\\_nl\\_es\\_pl.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/514950-an-01-ml-WECHSELR_CLASSICPOWER_de_en_fr_nl_es_pl.pdf)

[13] Mr.sc. J. Škare, dipl.ing.el., Akumulatorske baterije za sustave besprekidnog napajanja, Zagreb, Hrvatska

[14] N. Šujansky Izvori napajanja elektroničkih uređaja, Superkondenzatori, Zagreb, siječanj 2014.

## **SAŽETAK**

U diplomskom radu su opisane osnove potrebe za pohranom električne energije te princip rada spremnika električne energije sa prednostima i nedostacima. U diplomskom radu su opisane tehnologije koje se koriste za pohranu električne energije. A to su: reverzibilne hidroelektrane, spremnici sa komprimiranim fluidom, baterijski spremnici, spremnici koji koriste zamašnjak, te spremnici koji koriste superkondenzatore. Izvršena su mjerenja napona i struje punjenja i pražnjenja baterije te je opisan proces određivanja veličine i lokacije spremnika električne energije.

Ključne riječi: spremnik električne energije, distribucijska mreža, tehnologije za pohranu električne energije, reverzibilne hidroelektrane, spremnici s komprimiranim fluidom, baterijski spremnici, zamašnjak, superkondenzator.

## **ELECTRIC ENERGY STORAGE IN DISTRIBUTION GRID**

### **ABSTRACT**

In this thesis are described basics need for electric energy storage, and principle of work energy storage with it advantages and disadvantages. In thesis also are described technology which are used for electric energy storage. Some of these are: pumped hydro, storage with compressed fluid, battery storage, storage with flywheel, and supercapacitor storage. There is made process of measurement voltage and current of charging and discharging battery. And also in thesis is described process of defining size and location of electric energy storage.

Keywords: electric energy storage, distribution grid, technology used for electric energy storage, pumped hydro plant, storage with compressed fluid, battery storage, flywheel, supercapacitor storage.

## **ŽIVOTOPIS**

Krunoslav Razumović rođen je 15. Listopada 1991. godine u Požegi. Osnovnu školu završava u Kutjevu. Srednju tehničku školu u Požegi upisuje 2004. godine, smjer tehničar za računalstvo. Zvanje tehničara za računalstvo stječe 2010. godine sa maturanim radom na temu: „Građa računalnih mreža“. Sveučilišni preddiplomski studij na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer elektroenergetika upisuje 2010. godine. Zvanje prvostupnika elektrotehnike stječe 2013. godine sa završnim radom na temu: „Sklopovi energetske elektronike za priključak gorivnih ćelija na trošila“. Sveučilišni diplomski studij na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer elektroenergetika upisuje 2013. godine.